



Zero-Emission Energy Research

Joint Usage/Research Center,
Institute of Advanced Energy,
Kyoto University

京都大学エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点
共同利用・共同研究 成果報告書

平成26年度





Zero-Emission Energy Research

Joint Usage/Research Center,
Institute of Advanced Energy,
Kyoto University

京都大学エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点
共同利用・共同研究 成果報告書

平成26年度



ご挨拶

エネルギー理工学研究所が平成 23 年度に開始した共同利用・共同研究拠点「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」も今年度(平成 26 年度)末で 4 年が経過し、認定期間終了まであと 1 年を残すところとなりました。東日本大震災以降エネルギーのあり方や考え方が大きく問われる中、自然や環境に優しく、すべての人々が豊かで活力ある生活を送ることができるエネルギーのパラダイムシフトが求められていることは言うまでもありません。今回、本拠点の平成 26 年度成果報告会を実施する運びとなりましたが、この間、本拠点活動に対して多大なご支援とご協力をいただきましたことに厚く御礼申し上げます。

現在、共同利用・共同研究拠点は全国に 81 か所(平成 26 年現在)ありますが、その中で「エネルギー」を前面に出している拠点は限られ、本拠点はその一つです。その中でもエネルギーを特定な種類に限定することなく「ゼロエミッションエネルギー」という概念をタイトルに掲げているのがこの拠点のユニークな点と言えます。エネルギーは多様な分野の融合研究としての色彩を強く持っていますが、それらを共有するプラットフォームとして、それら多様な分野と連携・協力して次世代を担う新しいエネルギーの学理を構築していくことが本拠点の重要な使命であると考えています。

昨年、本研究所との共催で開催した国際シンポジウム(9 月 30 日-10 月 2 日)では *Contribution to Zero-Emission Energy* のサブタイトルのもと、幅広い学会関係の方々に参集いただき「ゼロエミッションエネルギー」の視点でエネルギー研究を進めていくことの意義や役割について活発な議論をいただきました。本拠点の関連分野への積極的な貢献とともに、新しいコミュニティ形成への期待が寄せられました。

今後、現拠点活動の最終評価や平成 28 年度からの第 2 期拠点活動の取り組みに向けた検討を行うこととなりますが、引き続きご協力とご支援をいただきますよう、よろしくお願い申し上げます。

平成 27 年 3 月
京都大学エネルギー理工学研究所
所長 岸本泰明

平成 27 年 3 月 4 日 (水)
京都大学 宇治キャンパス エネルギー理工学研究所
北 4 号棟 大会議室

京都大学エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点
平成 26 年度
共同利用・共同研究成果報告会
【プログラム】

(受付開始 9:30)

開会の辞

10:00 – 10:05 片平正人 共同利用・共同研究計画委員会 委員長

セッション 1 座長：門 信一郎

- 10:05 – 10:30 蜂谷 寛 (京都大学：A-26)
「中赤外自由電子レーザーによるワイドギャップ半導体における
選択的格子振動励起」
- 10:30 – 10:50 金田保則 (秋田工業高等専門学校：B-40)
「ジルコニウム合金における添加元素と水素・酸素元素との相互作用に
関する理論的研究 (その 2)」
- 10:50 – 11:10 今西未来 (京都大学：B-38)
「修飾塩基を特異的に認識する人工タンパク質の創製」
- 11:10 – 11:30 休憩

セッション 2 座長：増田 開

- 11:30 – 11:55 山名一成 (兵庫県立大学：A-5)
「DNA-有機色素複合体を利用した光・エネルギー変換システム」
- 11:55 – 12:15 三澤 毅 (京都大学：B-29)
「重水素プラズマ慣性静電閉じ込め装置 (IEC) から発生する
パルス状放射線の計測技術の開発」
- 12:15 – 12:35 小鍋 哲 (筑波大学：B-23)
「新規エネルギー変換に向けた原子層材料の基礎物性の解明」
- 12:35 – 13:30 昼食

セッション 3 座長：檜木達也

- 13:30 – 13:55 波多野雄治（富山大学：A-7）
「核融合炉第一壁およびダイバータ材料中の水素同位体滞留・透過挙動に及ぼす高温照射の影響」
- 13:55 – 14:20 米村弘明（九州大学：A-27）
「色素-金属ナノ粒子複合膜における光電流に及ぼす磁場と金属ナノ粒子の効果」
- 14:20 – 14:40 石澤明宏（核融合科学研究所：B-33）
「ヘリカル系プラズマの乱流の非線形ダイナミクスと構造の探求」
- 14:40 – 15:00 休憩

セッション 4 座長：岡田浩之

- 15:00 – 15:25 政宗貞男（京都工芸繊維大学：A-18）
「ヘリカル軸逆磁場ピンチ配位への自己組織化ダイナミクスとその制御によるプラズマ高性能化」
- 15:25 – 15:45 安田和弘（九州大学：B-46）
「酸化物/窒化物セラミックスの照射誘起微細構造～電子励起および選択的はじき出し損傷の効果～」
- 15:45 – 16:05 宇都義浩（徳島大学：B-10）
「ゼロエミッションエネルギーを指向した中性子捕捉型抗腫瘍剤の開発」

閉会の辞

- 16:05 – 16:10 岸本泰明 エネルギー工学研究所 所長

目 次

第一部 公募型共同利用・共同研究	1
第二部 拠点活動実績	171
平成 26 年度 活動実績	173
第三部 その他	177
平成 27 年度 公募案内	179
平成 26 年度 共同利用・共同研究推進室 アンケート調査結果	184

第一部 公募型共同利用・共同研究

第一部 公募型共同利用・共同研究

(Informal Meeting)

- 核融合エネルギー研究開発のブレイクスルーをもたらす
新しい導入シナリオの検討 (ZE26) ……………12
宮澤順一 核融合科学研究所

(A) 企画型共同研究

1. 爆接による核融合炉ダイバータ素子の開発 (ZE26A-1) ……………14
外本和幸 熊本大学パルスパワー科学研究所
2. ダイバータを模擬した高温下にて重イオン照射したタングステン中の
水素同位体滞留挙動評価 (ZE26A-2) ……………16
大矢恭久 静岡大学大学院理学研究科
3. 活性汚泥常在性細菌由来の高付加価値バイオマス (ZE26A-3) ……………18
武田 穰 横浜国立大学大学院工学研究院
4. 遺伝子発現を制御する人工 RNA と転写因子の相互作用解析 (ZE26A-4) ……………20
坂本泰一 千葉工業大学工学部
5. DNA-有機色素複合体を利用した光・エネルギー変換システム (ZE26A-5) ……………22
山名一成 兵庫県立大学大学院工学研究科
6. バイオマスの高度利用に向けた細胞壁リグニン超分子構造の
 ^{13}C 標識を利用した NMR 解析 (ZE26A-6) ……………24
福島和彦 名古屋大学大学院生命農学研究科
7. 核融合炉第一壁およびダイバータ材料中の水素同位体滞留・
透過挙動に及ぼす高温照射の影響 (ZE26A-7) ……………26
波多野雄治 富山大学水素同位体科学研究センター
8. 高フルエンス水素プラズマ-タングステン材料相互作用による
原子空孔での多重水素捕獲・熱放出過程の研究 (ZE26A-8) ……………28
加藤太治 核融合科学研究所ヘリカル研究部

9.	二酸化炭素をアルコールに酵素変換する		
	ポリマーハイブリッドナノファイバーの開発 (ZE26A-9)	……………	30
	田中直毅	京都工芸繊維大学生体分子工学部門	
10.	低放射化フェライト鋼-ODS 鋼異材接合材の機械特性 (ZE26A-10)	……………	32
	長坂琢也	核融合科学研究所ヘリカル研究部	
11.	省エネルギー型発光素子用材料の設計と開発 (ZE26A-11)	……………	34
	清水正毅	京都工芸繊維大学生体分子工学部門	
12.	低放射化フェライト鋼および ODS 鋼の照射下相安定性に関する		
	機構論的研 (ZE26A-12)	……………	36
	阿部弘亨	東北大学金属材料研究所	
13.	低放射化核融合炉材料の重照射効果に関する研究 (ZE26A-13)	……………	38
	谷川博康	(独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門	
14.	高速増殖炉被覆管材における FP 腐食に対する		
	アルミナ被膜の化学的安定性 (ZE26A-14)	……………	40
	福元謙一	福井大学附属国際原子力工学研究所	
15.	先進タングステン合金の耐照射性機構解明に関する研究 (ZE26A-15)	……………	42
	長谷川晃	東北大学大学院工学研究科	
16.	核融合炉構造材料中のバブル・ボイド形成に対する		
	損傷速度とヘリウム生成率の効果 (ZE26A-16)	……………	44
	山本琢也	University of California Santa Barbara	
17.	バイオリファイナリーのための超高感度 NMR による		
	リグニンの構造解析 (ZE26A-17)	……………	46
	渡辺隆司	京都大学生存圏研究所	
18.	ヘリカル軸逆磁場ピンチ配位への自己組織化ダイナミクスと		
	その制御によるプラズマ高性能化 (ZE26A-18)	……………	48
	政宗貞男	京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科	

19. 放電型核融合中性子源における D-T 放電特性の研究 (ZE26A-19)	50
大澤穂高 関西大学システム理工学部	
20. イオンビームを用いた高粒子・高熱負荷実験設備の整備と 核融合炉ダイバーター材の試験 (ZE26A-20)	52
山本 靖 関西大学システム理工学部	
21. リチウム鉛合金中におけるリチウム酸化物の化学的挙動に関する研究 (ZE26A-21)	54
近藤正聡 東海大学工学部原子力工学科	
22. レーザーフォトカソード RF 電子銃を用いた KU-FEL エネルギーの増強と利用 (ZE26A-22)	56
黒田隆之助 (独) 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門	
23. 繰り返し高熱負荷環境およびパルス高熱負荷環境下における タングステンの損傷形成機構に関する研究 (ZE26A-23)	58
江里幸一郎 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門	
24. 核融合原型炉用酸化物分散強化型低放射化フェライト鋼の キャラクタリゼーション (ZE26A-24)	60
酒瀬川英雄 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門	
25. 先進接合法により製作した低放射化フェライト鋼接合部の腐食特性評価 (ZE26A-25)	62
廣瀬貴規 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門	
26. 中赤外自由電子レーザーによるワイドギャップ半導体における 選択的格子振動励起 (ZE26A-26)	64
蜂谷 寛 京都大学大学院エネルギー科学研究科	
27. 色素-金属ナノ粒子複合膜における光電流に及ぼす磁場と 金属ナノ粒子の効果 (ZE26A-27)	66
米村弘明 九州大学大学院工学研究院応用化学部門	

(B) 提案型共同利用・共同研究

28. 狭帯域検出器を用いたコヒーレント放射光出力測定による
電子バンチ長評価の研究 (ZE26B-1)68
清 紀弘 (独) 産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門
29. 特殊なマイクロ空間内で形成された階層性分子組織構造の構造評価 (ZE26B-2)70
沼田宗典 京都府立大学大学院生命環境科学研究科
30. 翻訳開始因子複合体における情報伝達機構の構造生物学的研究 (ZE26B-3)72
尾林栄治 島根大学医学部
31. レーザーパルス最適制御による光化学反応の高効率化 (ZE26B-4)74
大槻幸義 東北大学大学院理学研究科
32. 気液界面に照射された大気圧プラズマジェットが生成する
活性ラジカル計測 (ZE26B-5)76
松浦寛人 大阪府立大学地域連携研究機構放射線研究センター
33. 細胞機能を制御するための新奇修飾アンチセンス核酸の開発研究 (ZE26B-6)78
萩原正規 弘前大学理工学研究科
34. ゼロエミッションエネルギーの社会的受容性を適切に調査するための
討論型世論調査手法の構築と科学教育 (ZE26B-7)80
岩切宏友 琉球大学大学院教育学研究科
35. 細胞内エネルギー代謝シグナルの可視化を目指した蛍光プローブ開発 (ZE26B-8)82
佐藤慎一 京都大学物質-細胞統合システム拠点
36. SMBIのためのノズルからの流れの解析 (ZE26B-9)84
西野信博 広島大学大学院工学研究科
37. ゼロエミッションエネルギーを指向した中性子捕捉型抗腫瘍剤の開発 (ZE26B-10)86
宇都義浩 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
ライフシステム部門

38. 複数の数値シミュレーションによる三次元プラズマ中の 高エネルギー粒子輸送解析 (ZE26B-11)	88
中嶋洋輔 筑波大学数理物質系	
39. 高熱伝導複合材料の開発と組織制御 II (ZE26B-12)	90
佐々木元 広島大学大学院工学研究院材料生産加工部門	
40. マイクロ波によるプラズマ乱流計測 (ZE26B-13)	92
稲垣 滋 九州大学応用力学研究所	
41. トーラスプラズマのトロイダル方向 2 点における 電子サイクロトロン波放射同時計測 (ZE26B-14)	94
吉村泰夫 核融合科学研究所ヘリカル研究部	
42. 有機薄膜太陽電池の高効率化を目指した 有機-無機ハイブリッド膜の開発 (ZE26B-15)	96
秋山 毅 滋賀県立大学工学部	
43. Fe 系構造材料中のナノクラスター解析 (ZE26B-16)	98
渡辺英雄 九州大学応用力学研究所	
44. 核融合炉プラズマ対向材料の特性に及ぼす照射効果 (ZE26B-17)	100
徳永和俊 九州大学応用力学研究所	
45. SiC/SiC 複合材料の疲労寿命評価手法に関する研究 (ZE26B-18)	102
野上修平 東北大学大学院工学研究科	
46. 超音波誘導型細胞質内物質導入法の開発 (ZE26B-19)	104
原田敦史 大阪府立大学工学研究科	
47. 先進 SiC 基材料の複合的高温環境特性 (ZE26B-20)	106
下田一哉 (独) 物質・材料研究機構先進高温材料ユニット	
48. 電子サイクロトロン波帯の電磁波を用いた ビート波によるイオン加熱 (ZE26B-21)	108
設楽弘之 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門	

49. 単一電子ビーム照射技術開発による微視的トラック構造研究 (ZE26B-22) …… 110
魚住裕介 九州大学大学院工学研究院
50. 新規エネルギー変換に向けた原子層材料の基礎物性の解明 (ZE26B-23) …… 112
小鍋 哲 筑波大学数理物質系物理学域
51. 高温プラズマでの乱流計測のための
多チャンネル分光計測システムの開発 (ZE26B-24) …… 114
藤澤彰英 九州大学応用力学研究所
52. 照射下材料マイクロ構造変化の照射場依存性に関する
モデリング・シミュレーション (ZE26B-25) …… 116
渡辺淑之 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門
53. 先進 SiC/SiC 複合材料の形状安定性・微細組織に及ぼす照射温度依存性 (ZE26B-26) 118
小沢和巳 (独) 日本原子力研究開発機構核融合炉構造材料開発グループ
54. 真空紫外パルスの位相計測と電子状態制御 (ZE26B-27) …… 120
板倉隆二 (独) 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門
55. 負三角度トカマクとヘリカルと比較研究 (ZE26B-28) …… 122
菊池 満 (独) 日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門
56. 重水素プラズマ慣性静電閉じ込め装置(IEC)から発生する
パルス状放射線の計測技術の開発 (ZE26B-29) …… 124
三澤 毅 京都大学原子炉実験所原子力基礎工学研究部門
57. 顕微分光による高品質グラフィンおよびカーボンナノチューブの
光・電子物性評価 (ZE26B-30) …… 126
北浦 良 名古屋大学大学院理学研究科物質理学専攻 (化学)
58. イオン照射 dewetting を利用したガラス基板表面の
金属ナノ構造制御 (ZE26B-31) …… 128
柴山環樹 北海道大学大学院工学研究院

59. 核融合壁材料健全性評価のためのレーザー照射とイオンビーム照射による
タングステン溶融層の挙動解析 (ZE26B-32) …… 130
伊庭野健造 大阪大学大学院工学研究科電気電子情報工学専攻
60. ヘリカル系プラズマの乱流の非線形ダイナミクスと構造の探求 (ZE26B-33) …… 132
石澤明宏 核融合科学研究所ヘリカル研究部
61. 極短パルス CEP 制御レーザーとクラスター媒質の相互作用実験と
理論・シミュレーション研究 (ZE26B-34) …… 134
福田祐仁 (独) 日本原子力研究開発機構量子ビーム応用研究部門
62. ナノポーラス電極での表面誘起相転移に基づく
大容量電気二重層キャパシタの開発 (ZE26B-35) …… 136
深見一弘 京都大学大学院工学研究科材料工学専攻
63. 顕微分光による原子層物質の光学特性解明 (ZE26B-36) …… 138
宮田耕充 首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻
64. 高効率な希少金属回収システム構築を目指した希少金属結合性タンパク質の
DNA ナノ構造体 (DNA オリガミ) への集積化 (ZE26B-37) …… 140
森 泰生 京都大学大学院地球環境学学
65. 修飾塩基を特異的に認識する人工タンパク質の創製 (ZE26B-38) …… 142
今西未来 京都大学化学研究所
66. 高集積型機能性タンパク質酵素回路の構築 (ZE26B-39) …… 144
相澤康則 東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センター
67. ジルコニウム合金における添加元素と水素・酸素元素との相互作用に関する
理論的研究 (その2) (ZE26B-40) …… 146
金田保則 秋田工業高等専門学校一般教科 (自然科学系)
68. Irradiation-induced microstructural evolution and swelling of 3C-SiC (ZE26B-41) …… 148
Ji-Jung Kai Department of Engineering and System Science, NTHU
69. Hybrid Solar Energy Research suitable for Rural Electrification (ZE26B-42) …… 150
Hew Wooi Ping University of Malaya

70. 核融合炉複合照射環境下におけるタングステン中の水素同位体挙動 (ZE26B-43) ……	152
上田良夫	大阪大学大学院工学研究科
71. Fe-Cr-Ni 合金中の照射損傷組織に及ぼす SFE の影響 (ZE26B-44) ……	154
藪内聖皓, 長谷川晃	東北大学大学院工学研究科
72. 先進原子力材料としての粒子析出/分散強化型ニッケル基合金の 照射影響評価 (ZE26B-45) ……	156
鵜飼重治	北海道大学大学院工学研究院
73. 酸化物/窒化物セラミックスの照射誘起微細構造 ～電子励起および選択的はじき出し損傷の効果～ (ZE26B-46) ……	158
安田和弘	九州大学大学院工学研究院
74. 低放射化鋼の機械的特性におよぼす温度と組織の影響 (ZE26B-47) ……	160
木下博嗣	福島工業高等専門学校機械工学科
75. ヘリオトロン J 装置における輻射輸送コードの開発 (ZE26B-49) ……	162
川染勇人	香川高等専門学校情報工学科

(C) 共同利用

76. 搬送波-包絡線位相を制御したサイクルレーザーパルスによる アト秒パルス光の発生過程 (ZE26C-1) ……	164
宮地悟代	東京農工大学工学部物理システム工学科
77. 赤外自由電子レーザーを用いた光触媒物質成膜および 生物 CO ₂ 固定の研究 (ZE26C-2) ……	166
寒河江登志朗	日本大学松戸歯学部
78. ヘリオトロン J に於ける作動型ダブルプローブによる 周辺計測と高周波加熱の研究 (ZE26C-3) ……	168
上原和也	宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所

核融合エネルギー研究開発のブレイクスルーをもたらす 新しい導入シナリオの検討

宮澤順一¹, 笠田竜太², 小西哲之², 武田秀太郎³, Gwon Hyoseong², 増田 開²,

木村晃彦², 水内 亨², 岸本泰明^{2,4}, 落合謙太郎⁵, 菊池 満⁵

¹核融合科学研究所, ²京都大学エネルギー理工学研究所

³京都大学思修館 (院生), ⁴京都大学エネルギー科学研究科, ⁵日本原子力研究開発機構

1. 概要

核融合エネルギー開発においては、核融合研究者による課題の解決に向けた研究開発が必須であることは言うまでもないが、広く社会の要請に応えうる、或いは社会に対して新しい価値を提示しうるようなイノベティブなアイデアを提示することも重要である。京都大学エネルギー理工学研究所の共同利用・共同研究拠点において掲げる「ゼロミッションエネルギー」は、有害物質を出さないという究極の目標を掲げる単純な理念ではなく、そこに至る社会的プロセスや技術開発を統合的に俯瞰するような視点を提示するものであると考えられる。従来の核融合エネルギー開発は、将来のエネルギー需要の増大に応えるべく進められてきた背景を持つが、21世紀の先進国たる我が国において持続的発展可能社会の実現に貢献するようなエネルギーの在り方は、そのような高度成長期モデルに基づく検討のみでは不足していることは明白である。

本共同研究では、核融合エネルギーの開発に携わる研究者が ZE 拠点に集まり、より幅広い視座に基づく新しい核融合エネルギーの早期実現に向けた可能性を論じる。このために、様々な形で核融合の応用あるいはエネルギー研究を進める研究者を集め、それぞれの研究について示すとともに、ZE の視点から新たな展開の可能性について熟考する研究会を開催する。

2. 研究会の内容

平成 27 年 1 月 20、21 日の二日間にわたって「核融合研究開発のブレイクスルーはどこにあるか？～ゼロエミッションとサイクルの視点で熟考する～」というテーマでインフォーマルミーティングを開催し、核融合エネルギー開発のブレイクスルーの可能性に関連する講演を行うとともに、ゼロエミッションの観点からの考察を深めた。

セッション 1 「ゼロエミッションと核融合」においては、水内教授による「ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動」の紹介の後、小西教授より「核融合炉のエミッションと社会、環境—ゼロエミッションとは何なのか？」という講演を受けて、核融合炉からのエミッションとして特にトリチウムについて議論を行った。セッション 2 「核融合炉開発のブレイクスルー」においては、木村教授より「核融合炉構造材料開発とゼロエミッション材料リサイクル」と題して、特に ODS 鋼の特徴と優位性が示され、材料リサイクルと低放射化について議論があった。菊池氏からは「核融合研究開発のブレイクスルー：除熱性能の飛躍的改善に向けて」と題して、Negative D 方式の可能性について示された。セッション 3 「ゼロエミッション核融合エネルギーの応用とプラズマ物理」においては、増田准教授より「静電核融合中性子源装置の中性子利用」と題して、慣性静電核融合中性子源を用いた核燃料物質探知に関する最近の研究とともに、その他の核融合中性子の利用可能性について示された。落合氏からは「核融合中性子源の利用形態」と題して、これまでの核融合中性子源に関する研究成果が述べられるとともに、現在計画されている IFMIF/EVEDA 原型加速器を利用した中性子源の検討状況について説明があった。また、岸本教授からは「ゼロエミッションの視点による非線形プラズマの物理」と題して、極微小のエネルギー変化でシステムの質的变化をもたらすようなプラズマのふるまいに関する学理を通して、ゼロエミッションの理念に関する示唆に富む講演があった。

ZE26 (Informal Meeting)

二日目のセッション3「ゼロエミッション核融合エネルギー研究とエネルギーサイクル」においては、小西教授が提唱する「バイオマスハイブリッド核融合炉」の総説があった。また、同研究室の大学院生である武田氏からは「核融合炉起動のためのインバースダム構想」という核融合炉の起動やディスラプション時の系統負荷を低減するアイデアについて示された。宮澤からは「ヘリカル型核融合炉の多目的運用の可能性」と題して、核融合研で検討を進めるFFHRの運転シナリオや活用法の提案があった。権氏からは「新たな概念のダイバータの開発、その実現のためのチャレンジ」として、潜熱を用いた熱輸送デバイスによる高い除熱性能を有するダイバータの検討状況について報告があった。最後に笠田准教授からは「エネルギーシステムの寿命とサイクル」と題して、氏の進めるエコシステムのサイクルと寿命に関する研究を引用しつつ、2050年以降に想定しうる多様な社会の要求に応える柔軟な核融合エネルギー開発の必要性が提示された。

3. 総括

核融合エネルギーに関する要素技術あるいは専門性の高い物理・工学研究に従事している研究者が、俯瞰的かつバックキャスト的な視点から核融合エネルギー研究開発をどのように捉え、社会に対して説明していくかという点は、今後益々重要になると考えられる。今回のインフォーマル会合においてゼロエミッションというキーワードをベースとすることによって学会とは異なる多様な議論を進められ示唆に富む知見が得られたと考えている。今後もゼロエミッションエネルギーという分野横断的な視点を有する当拠点を活用して、核融合エネルギーの研究開発の位置づけを多角的に検討することを可能とするような、より幅広いネットワークの構築を進めていくことが肝要であると考えられる。

爆接による核融合炉ダイバータ素子の開発

外本和幸¹, 森園靖浩², 青木孝輔², 落合良介², Gwon Hyoseong², 笠田竜太², 小西哲之²

¹熊本大学パルスパワー科学研究所, ²自然科学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 概要

核融合炉のプラズマ対向第一壁材料として、基材（低放射化フェライト鋼や銅など）にタングステン材料を被覆することが求められている。本共同研究では、熊本大学において水中爆接法を用いてタングステンを被覆した F82H 鋼や無酸素銅材を作製し、京都大学エネルギー理工学研究所において被覆材の微細組織や強度特性、耐熱性等を評価した。無酸素銅材とタングステンの接合界面には、数 $10\mu\text{m}$ 程度の厚さの中間層の形成が見られ、昨年度までに評価した F82H 鋼とタングステンの接合界面とは異なる組織形成挙動を示した。

2. 緒言

核融合炉コンポーネントへのタングステン被覆法として水中爆接法の適用可能性を検討している。爆接法とは、爆ごうする際の高圧力を利用して、被覆材を加速飛翔させ、基材に衝突・接合させる接合法である。大面積の接合面にも適用可能である為、核融合ブランケットへのタングステンアーマー被覆法としても有望視されており、欧州でも検討が進められている。本共同研究においては、このようなブランケット第一壁や更には先進ダイバータ概念として京都大学が検討している熱輸送デバイスにおける銅材への表面被覆法として、特に水中爆発溶接法の適用性を検討する。水中爆接法は、水中での衝撃波を利用することで、空気中で行う通常法に比べ非常に短い距離で飛翔板を高速度に均一に加速することができるという特徴がある。本年度は、水中爆接法によって作製したタングステン被覆銅材料の微細組織や機械特性評価を行った結果を報告する。

3. 実験及び結果

熊本大学において、水中爆接法により 0.2mm 厚のタングステンを無酸素銅に被覆する事に成功した (Fig. 1, 2)。

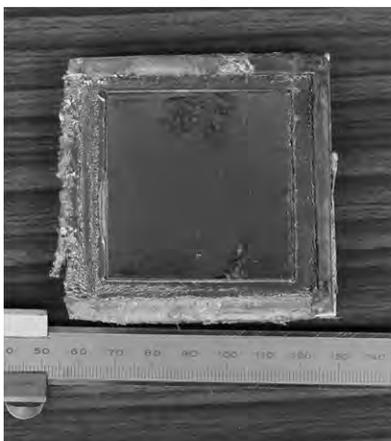


Fig.1 爆接後の試料

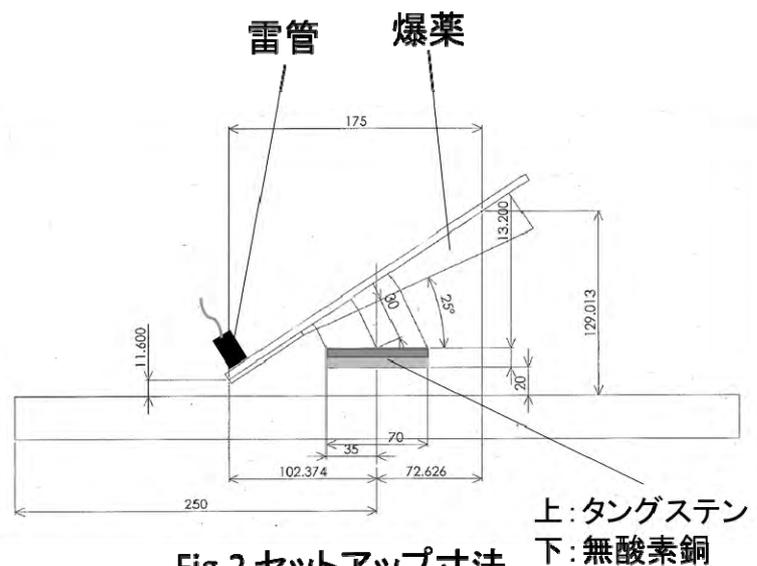


Fig.2 セットアップ寸法

上: タングステン
下: 無酸素銅

接合界面部の断面組織観察を行ったところ (Fig. 3)、昨年度までに実施した低放射化フェライト鋼へのタングステン被覆の場合に見られた界面の波状構造はやや乱れており、中間相は数十 μm 程度の厚さを有していた。

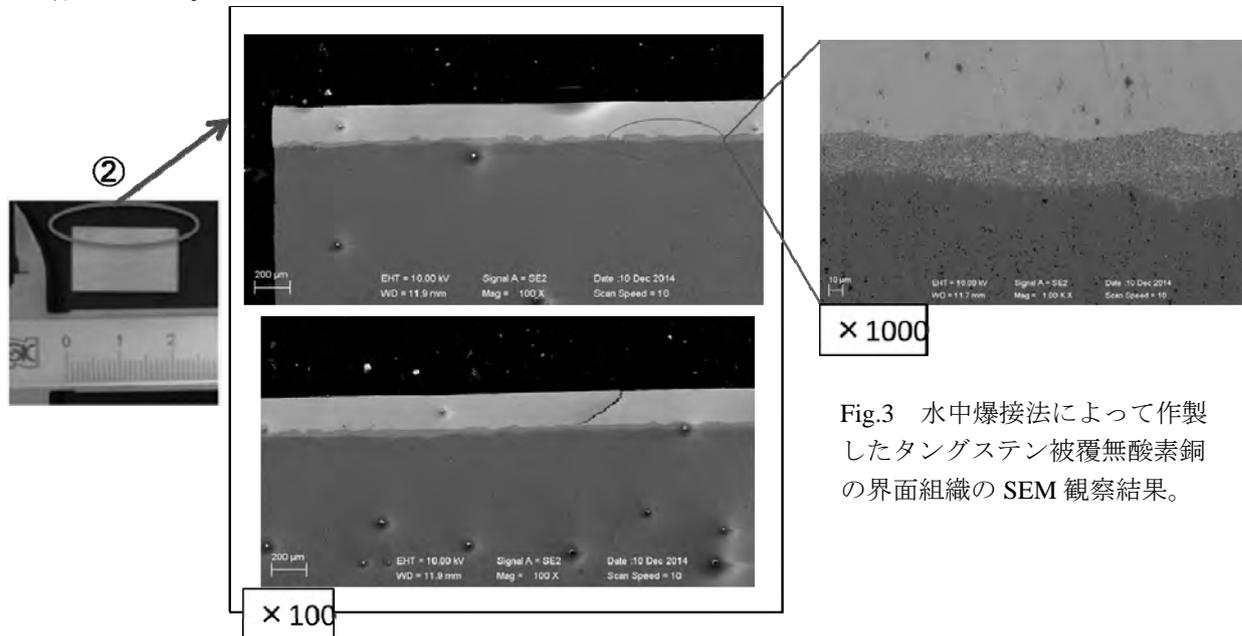


Fig.3 水中爆接法によって作製したタングステン被覆無酸素鋼の界面組織のSEM観察結果。

EPMA による分析結果によると (Fig.4)、中間相は銅中にタングステン粒子が分散して点在しており、鉄鋼材料の場合のように混ざり合っていないことがわかった。平衡状態図によると Cu への W の溶解度は極めて低いことから、接合中に銅表面部が溶けて液相となったところにタングステンの金属ジェットが入り込み急激に冷却した結果、銅中に分散してタングステンが点在したと考えられる。次年度は、京都大学の有するレーザー熱衝撃試験を用いて耐熱性や熱輸送特性に関する評価を行い、核融合炉内機器としての適用性について検討する予定である。

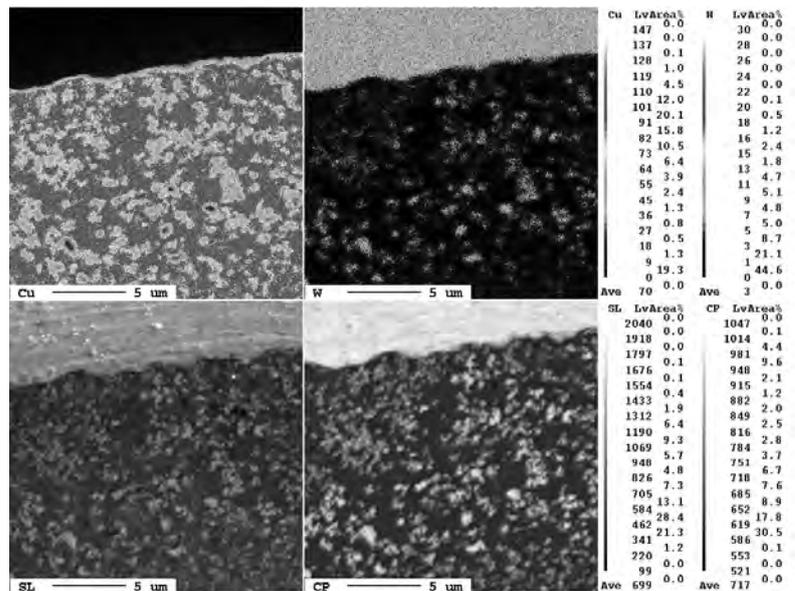


Fig. 4 接合界面部のEPMA元素マップ分析結果

4. 本年度 発表リストについて

[口頭発表リスト]

Ryosuke Ochiai, Ryuta Kasada, Hyoseong Gwon, Daichi Mori, Satoshi Konishi, Yasuhiro Morizono, and Kazuyuki Hokamoto, "Thermal properties of tungsten - F82H steel joint formed by underwater explosive welding", SOFT2014, October 2014, San Sebastian, Spain.

[論文発表リスト]

D. Mori, R. Kasada, S. Konishi, Y. Morizono, K. Hokamoto, "Underwater explosive welding of tungsten to reduced-activation ferritic steel F82H", Fusion Engineering and Design, 89 (2014) pp. 1086-1090.

ダイバータを模擬した高温下にて重イオン照射した タングステン中の水素同位体滞留挙動評価

大矢恭久¹, 佐藤美咲¹, 湯山健太¹, 近田拓未¹,

近藤創介², 檜木達也²

¹ 静岡大学大学院理学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

将来の核融合炉プラズマ対向壁にタングステンの利用が検討されている。DT 核融合反応によって中性子および高エネルギーイオンが直接プラズマ対向壁に入射するため、タングステン中には高密度の照射欠陥が形成・分布することが考えられる。特に中性子照射では、バルク内まで均一に照射欠陥が形成するのに対して、高エネルギーイオンはプラズマ対向面近傍に高密度に照射欠陥を形成することが考えられるとともに、ダイバータ条件に近い高温下では、照射損傷の回復と成長により材料の脆化などが進み、トリチウム滞留・透過挙動に大きく影響を及ぼす可能性が考えられる。そのため、中性子照射試料とイオン照射試料を比較することにより、トリチウム滞留挙動に及ぼす照射欠陥の分布や密度による影響を明らかにすることが可能である。現在、日米共同研究において中性子照射試料中のトリチウム滞留量評価研究を計画しており、本研究で得られるイオン照射試料の結果と比較することにより、照射欠陥とトリチウム滞留挙動との相関を明らかにすることができる。

そこで本研究では、高温で重イオン照射可能な DuET 装置を用いて、タングステン中に照射損傷を種々の温度条件で生成させ、これらの材料中のトリチウム滞留挙動について評価し、核融合炉条件に近い実環境下でのプラズマ対向材中のトリチウム滞留能を評価することを目的とした。

2. 実験

試料としてアライドマテリアル社製の歪取加工済タングステンを用いた。まず、不純物除去を目的として、1173 K にて 30 分間の加熱処理を行った。その後、照射欠陥導入のために京都大学エネルギー理工学研究所の高度エネルギー機能変換実験装置(DuET)にて Fe³⁺イオンを照射した。照射温度は 573, 873, 1173 K にて、損傷量が 1.0 dpa となるまで照射した。また、JAEA 高崎量子応用研究所の TIARA を用いて Fe²⁺イオンを室温にて 0.3 dpa まで照射した試料を 873 K にて 30 分間加熱した。その後、これらに 1 keV の重水素イオン(D₂⁺)をフラックス 1.0 × 10¹⁸ D⁺ m⁻² s⁻¹、フルエンス 1.0 × 10²² D⁺ m⁻² として、室温にて照射を行い、昇温脱離法(TDS)を用いて、各試料からの重水素放出挙動を解明した。また、陽電子消滅分光法(PAS)によって欠陥の形成挙動についても明らかにした。

3. 結果・考察

図 1 に種々の温度条件にて Fe³⁺を照射した試料における重水素放出スペクトルとシミュレーション結果を示す。400 K 付近と 800 K 付近の温度領域で重水素の放出が確認された。照射温度が上がるにつれて、重水素の滞留量は減少した。特に照射温度 1173 K の試料においては他の試料にみら

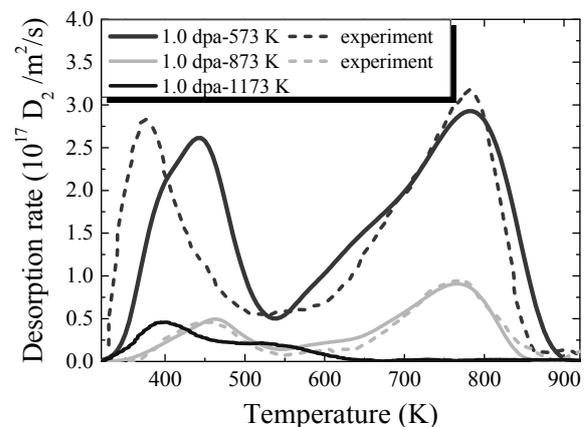


図 1 重水素 TDS スペクトルとシミュレーションによる結果

れる800 K付近の重水素放出は見られなかった。これは高温下の照射によりタングステン原子の拡散が起こり、照射欠陥である転位や原子空孔、ボイドが回復したためだと考えた。

また、シミュレーションの結果から重水素の放出 Stage を 300-500 K の stage 1、500-700 K の Stage 2、700-900 K の Stage 3 の三つに分離した。重水素の捕捉エネルギーは、Stage 1 は 0.85 eV、Stage 2 は 1.25 eV、Stage 3 は 1.55 eV であると見積もられた。これにより、Stage 1 は転位ループおよび表面吸着からの放出、Stage 2 は原子空孔からの放出、Stage 3 はボイドからの放出であると帰属した。

図2に PAS によって測定した各試料中における陽電子寿命を示す。照射温度の増加に伴い、より長寿命の陽電子が検出されたことから高温になるほど空孔型欠陥である原子空孔やボイドが集合して大きく成長することが示唆された。

図3に DuET を用いて 873 K にて照射した試料と TIARA にて室温にて 0.3 dpa まで照射した後に 873 K まで加熱した試料における重水素 TDS スペクトルを示す。高温照射試料では照射後加熱試料に比べ、損傷量は大きいにもかかわらず、重水素の滞留量は少なくなっている。これは高温照射下では熱による拡散だけでなく、照射による原子のはじき出しによりタングステン原子が動きやすくなり、欠陥の集合、回復が起こりやすくなるためだと考えた。

以上の結果から、高温照射では導入した欠陥が集合、回復するため欠陥密度が減少するのでタングステン中の重水素滞留量が減少することが示唆された。また、重水素滞留量の減少効果が照射後加熱に比べ高いことが示唆された。

4. 本年度 発表リスト

[ポスター発表リスト]

Misaki Sato, Kenta Yuyama, Xiao-Chun Li, Sosuke Kondo, Tatsuya Hinoki, Takumi Chikada, Yasuhisa Oya, "Effect of heat load on hydrogen isotope retention behavior for damaged tungsten", The 4th International Symposium of Advanced Energy Science, September 30-October 2, 2013, Kyoto University, Japan

Yasuhisa Oya, Misaki Sato, Kenta Yuyama, Long Zhang, Sosuke Kondo, Tatsuya Hinoki, Yuji Hatano, Naoaki Yoshida, Kenji Okuno, "D desorption behavior for Fe²⁺ damaged W with various damage concentration", 28th Symposium on Fusion Technology, 29th September 29-October 3, San Sebastian, Spain

Yasuhisa Oya, Misaki Sato, Kenta Yuyama, Long Zhang, Xiaochun Li, Yuji Hatano, Sosuke Kondo, Tatsuya Hinoki, Hideo Watanabe, Naoaki Yoshida, Takumi Chikada, "Hydrogen isotope retention behavior for ion damaged W at higher temperature", NuMat 2014, 27-30 October, 2014, Florida, USA

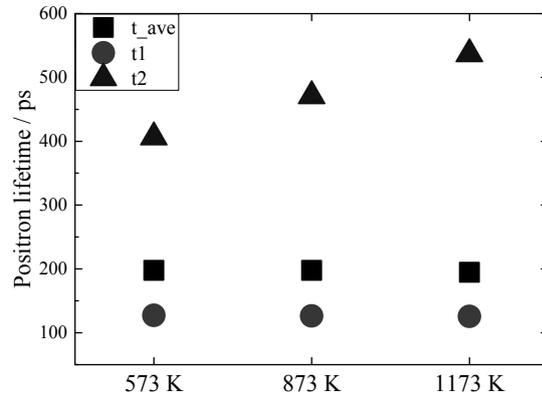


図2 種々の温度条件で欠陥導入した試料中における陽電子寿命

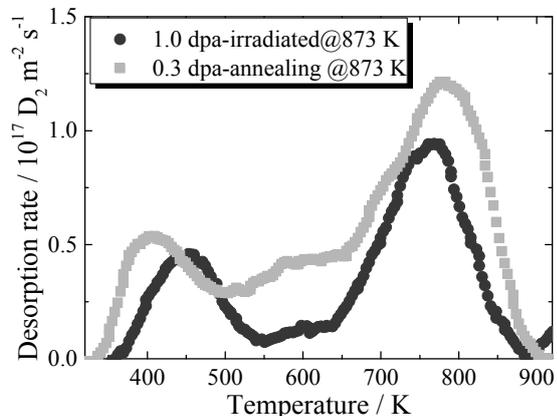


図3 高温照射と照射後加熱試料における重水素滞留挙動の比較

活性汚泥常在性細菌由来の高付加価値バイオマス

武田 穰¹, 近藤敬子², 成塚理絵¹, 片平正人²

¹横浜国立大学 工学研究院

²京都大学 エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

グルコースの重合体であるセルロースは植物や糸状菌の主たる細胞壁成分であり、バイオマス中に最も豊富に存在する有機物である。ただし、極めて高い剛直性を有する良質のセルロースを得るには酢酸菌による発酵生産が必要である。一方、*N*-アセチルグルコサミンの重合体であるキチンは甲殻類の外骨格の主成分であり、エビ・カニを多く消費する我が国においては入手し易いバイオマスの一つである。キチンとその脱アセチル化物であるキトサンには種々の生理活性が認められているものの、甲殻類アレルギーの恐れから安易に応用できない。したがって、発酵生産による供給が理想的である。さらに、セルロースとキチン・キトサンの特性を併せ持つと予想されるグルコース・グルコサミン共重合体（グルコサミノグルカン）の合成法が模索されてきた。我々はグルコサミノグルカンが活性汚泥に常在するマイクロチューブ形成細菌（*Thiothrix* 属の一部の種）のマイクロチューブ形成多糖において主鎖部分として同多糖が含まれることを明らかにした。さらに、同多糖のグルコース残基に結合した希少なデオキシ糖に起因する強い相互作用が多糖間の架橋を促し、安定なマイクロチューブをもたらすと予想した。すなわち、*Thiothrix* 属のマイクロチューブは *Thiothrix* 属の代表的マイクロチューブ形成細菌である *T. fructosivorans* においては 4-アミノラムノース（ペロサミン）という希少糖の存在が確認されている。同属の基準種である *T. nivea* (図1) もグルコサミノグルカンから成るマイクロチューブを形成するが (図2)、これを修飾するデオキシ糖の同定には至っておらず新規な単糖である可能性が高い (図3)。本研究の目的は、*T. nivea* のマイクロチューブ形成多糖を構成するデオキシ糖を同定するとともに、グルコサミノグルカン主鎖との結合位置を高感度 NMR 測定によって明らかにすることである。

2. 方法と結果

酢酸と硫化ナトリウムを炭素源とする液体培地で培養した *T. nivea* のフィラメントを溶菌酵素と水酸化ナトリウムで処理することによって、細胞を選択的に除去して残渣としてマイクロチューブ (図2) を得た。得られたマイクロチューブを希塩酸で部分加水分解したところ、マイクロチューブ構造は速やかに崩壊した。崩壊に伴って遊離した

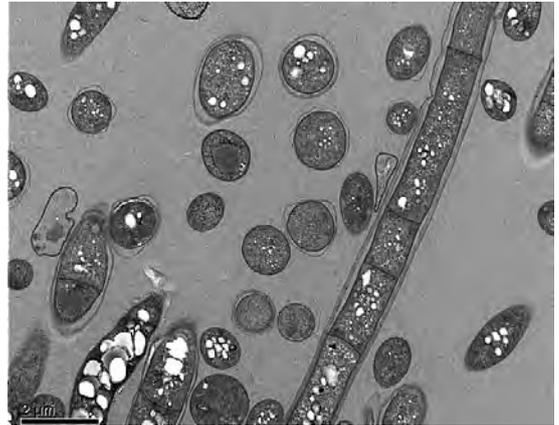


図1 *T. nivea* の TEM 像

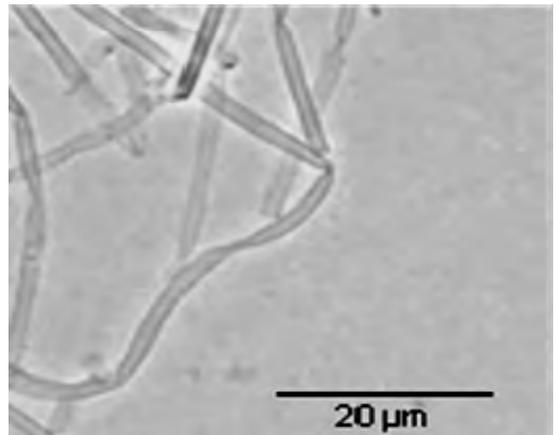
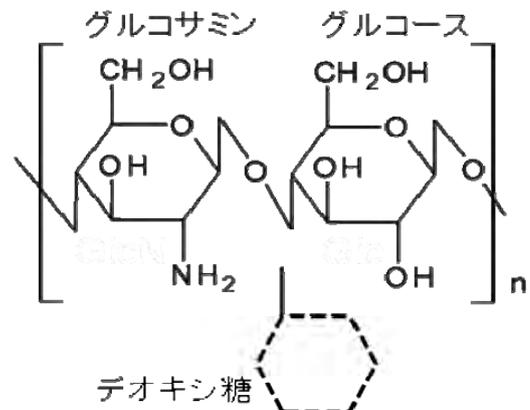


図2 マイクロチューブの位相差像



単糖およびオリゴ糖を ABEE (4-アミノ安息香酸 エチルエステル) 存在下での還元アミノ化によって ABEE 誘導体とした。これを逆相 HPLC で分析したところ、デオキシ糖由来と思しき誘導体が検出された。この誘導体を回収し質量分析を行ったところ分子量 313 と示された。さらに、超高感度 NMR 測定によって図 4 に示す構造を予想するに至った。同じ部分加水分解物に対して ABEE 化を経ずに順相 HPLC に供したところ、デオキシ糖と思しきピークが検出された。これをさらに逆相 HPLC で精製して質量分析を行ったところ分子量 134 と推定された。超高感度 NMR 測定では図 5 に示す推定構造を示すシグナルが観測された。これらの結果から、未同定のデオキシ糖は 5-デオキシ-3-ヒドロキシメチルペントフラノースと推察された。

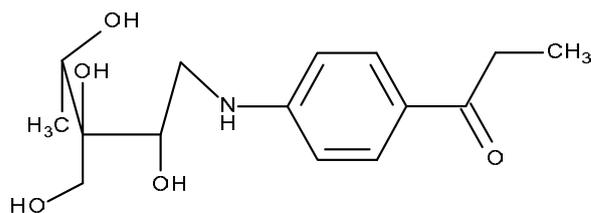


図 4 デオキシ糖誘導体の構造

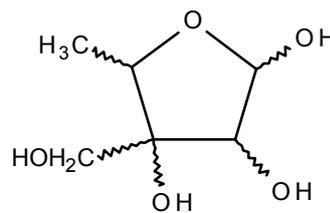


図 5 デオキシ糖の構造

次に、化学的手法でデオキシ糖とグルコサミングルカン主鎖との結合部位を調べた。マイクロチューブにスミス分解（分岐ないし置換基を有する糖残基のみ分解を免れる）を施した後、ABEE 化を経て逆相 HPLC 分析を行ったところ、グルコースのみが検出された。これはデオキシ糖がグルコース残基の 2 位ないし 3 位にグリコシド結合していることを示唆している。さらに詳細な分析を行うため、脱アセチル化したマイクロチューブギ酸酸性下で溶解し、超高感度 NMR 測定に供した。観測された NMR シグナルより、デオキシ糖が予想していたようにフラノース骨格を有すること、およびすべてのグルコース残基の 3 位にグリコシド結合していることが判明した (図 6)。未処理のマイクロチューブの固体 NMR では、アセチル基に由来するシグナルがほとんど検出されなかったことから、グルコサミン残基の大半は N-アセチル化されていないと予想された。アミノ基に起因する静電的反発力を凌ぐ相互作用がデオキシ糖残基によってもたらされていることは明らかである。ただし、マイクロチューブ調製時にアルカリ処理を行っているため、本来の N-アセチル化度を測定するには調製法の改良が必要である。さらに、デオキシ糖の完全同定もぜひ達成すべきである。

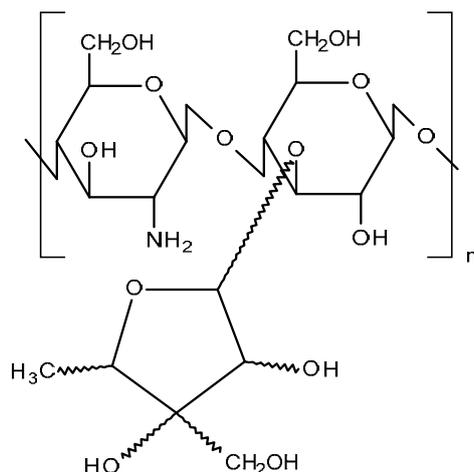


図 6 マイクロチューブ形成多糖の構造

3. 成果発表

[口頭発表]

河崎, 遠藤, 近藤, 片平, 武田“糸状性硫黄酸化細菌 *Thiothrix fructosivorans* 由来のマイクロチューブ形成多糖の構造決定”, 日本農芸化学会, 2015 年 3 月, 岡山

河崎, 佐藤, 遠藤, 成塚, 稲田, 近藤, 片平, 武田“糸状性硫黄酸化細菌が形成するマイクロチューブの微細構造”, 日本顕微鏡学会関東支部講演会, 2015 年 2 月, 東京 (ポスター)

K. Kondo, Y. Kawasaki, R. Narizuka, D.M. Sahabi, M. Katahira¹, M. Takeda, “High value-added biomass originated from a bacterium often found in activated sludge”, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, 2013 年 9 月, 京都 (ポスター)

遺伝子発現を制御する人工 RNA と転写因子の相互作用解析

高田健多¹, 天野 亮¹, 永田 崇², 小林直宏³, 野村祐介¹, 福永淳一⁴, 田中陽一郎⁴, 片平正人²,
中村義一⁵, 神津知子⁴, 坂本泰一¹

¹千葉工業大学工学部, ²京都大学エネルギー理工学研究所, ³大阪大学蛋白質研究所,
⁴埼玉県立がんセンター, ⁵(株) リボミック

1. 背景

現在、遺伝子組換えによって、バイオ燃料となる植物の改変やバイオマスであるセルロースを糖化する細菌の改変を行うことが可能となっている。しかし、遺伝子組換え植物や遺伝子組換え細菌の産業における利用は、生態系への影響を考えると注意が必要である。人工 RNA による植物や菌の改変は、ゲノムの遺伝子改変とは異なり、遺伝しないことから、安全な技術として注目されている。私たちは、人工 RNA を転写因子に作用させることによって、ゼロエミッションエネルギーの達成に有効な植物や細菌を改変することを視野に入れ、人工 RNA と転写因子の相互作用解析を行っている。

これまでに私たちは、転写因子として AML1 タンパク質に着目し、このタンパク質の Runt domain (RD) に結合する人工 RNA (Apt1-S; 図 1 a) の作製に成功している (1)。Apt1-S は、本来 RD が結合する DNA 配列に比べて約 10 倍強く RD に結合する ($K_d = 1.0$ nM)。また私たちは、Apt1-S の部分構造 (Apt1-S2; 図 1 b) を明らかにしており、構造解析の結果から Apt1-S2 が標的 DNA を擬態して結合することが示唆されている (2)。

そこで本研究では、これまでの研究を進展させ、人工 RNA と RD の相互作用様式について原子座標レベルで明らかにすることによって、人工 RNA をデザインするための分子基盤を確立することを目的とした。

2. 方法

人工 RNA を調製するためには、T7 RNA ポリメラーゼによる *in vitro* 転写系を用いた。RD の調製のためには、大腸菌による大量発現系を用いた。RD の C 末端に相当するペプチド (RCP; 図 1c) については化学合成した。RD と人工 RNA の複合体および RCP と人工 RNA の複合体について NMR 測定を行った。NMR シグナルを帰属するための三重共鳴実験では、超高感度検出器を備えた核磁気共鳴装置を用いた。NMR 解析ソフトウェアとしては、MagRO を用いた。

人工 RNA を作製するためには、SELEX 法を用いた。40 残基のランダム配列を含む鋳型 DNA を化学合成し、この鋳型 DNA ライブラリを用いて、転写反応により RNA プールを調製した。Ni-NTA 樹脂に固定化した RD に結合する RNA を選別した後、逆転写 PCR により、DNA ライブラリを再生した。これらの操作を繰り返し、RD に結合する人工 RNA を作製した。作製した人工 RNA の RD に対する親和性については、等温滴定型カロリメトリ (ITC) を用いて解析した。

3. 結果および考察

NMR を用いて、RD と Apt1-S の相互作用の解析を試みたところ、RD と Apt1-S の複合体の NMR シグナルがブロードニングしたため、構造解析が困難であった。そこで、RD に対して SELEX を行ない、新たに人工 RNA を作製した。ITC を用いて RD に対する結合活性を調べたところ、新しく作製した人

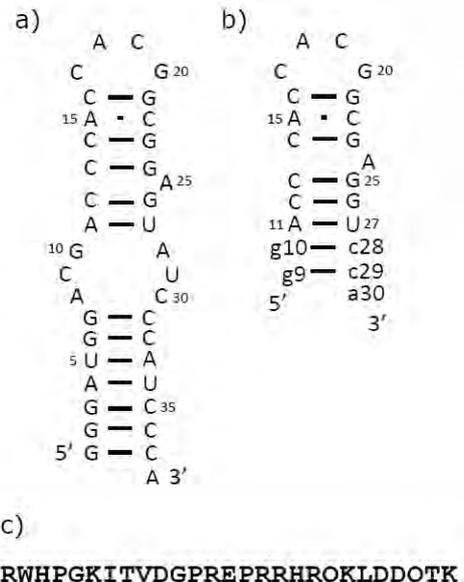


図 1 NMR 解析に用いた人工 RNA とペプチド. a) Apt1-S, b) Apt1-S2, c) RCP

工 RNA は Apt1-S の約 5 倍の親和性を示した。今後、NMR を用いて、新しい人工 RNA と RD の相互作用を解析する計画である。

また、RCP と Apt1-S2 の相互作用の解析を行なった。Apt1-S2 のイミノプロトンスペクトルを測定し、シグナルを帰属した (図 2)。さらに、RCP を加えてイミノプロトンスペクトルを測定したところ、ステムの中心付近に位置する G23、G25、U27 残基に由来するシグナルがシフトした。このことから、RD の C 末端に相当する RCP は人工 RNA に特異的に結合していることが示唆された。一方、複合体の立体構造を決定するために必要な NMR 情報は得られなかった。今後は、人工 RNA およびペプチドの配列の検討し、解析を進めていく計画である。

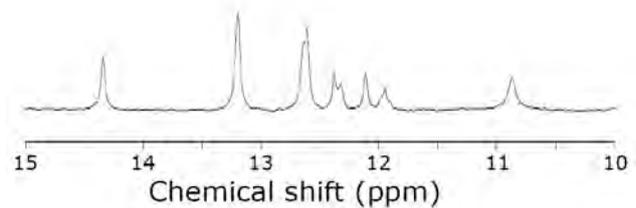


図 2 Apt1-S2 のイミノプロトンスペクトル

4. 参考文献

- 1) Fukunaga J., Nomura Y., Tanaka Y., Amano R., Tanaka T., Nakamura Y., Kawai G., Sakamoto T., Kozu T., "The Runt domain of AML1 (RUNX1) binds a sequence-conserved RNA motif that mimics a DNA element", *RNA*, **19**, 927-936, (2013).
- 2) Nomura Y., Fukunaga J., Tanaka Y., Fujiwara K., Chiba M., Iibuchi H., Tanaka T., Nakamura Y., Kawai G., Kozu T., Sakamoto T., "Solution structure of a DNA mimicking motif of an RNA aptamer against transcription factor AML1 Runt domain", *J. Biochem.*, **154**, 513-519, (2013).

5. 本共同研究による発表リスト

[口頭発表リスト]

- i) 天野亮, 野村祐介, 永田崇, 小林直宏, 高田健太, 福永淳一, 田中陽一郎, 片平正人, 中村義一, 神津知子, 坂本泰一, NMR による AML1 Runt ドメインと RNA アプタマーの相互作用の解析, 平成 26 年度日本分光学会年次講演会, 2014 年 5 月, 和光, ポスター
- ii) 高田健多, 天野亮, 永田崇, 片平正人, 中村義一, 神津知子, 坂本泰一, AML1 タンパク質の Runt ドメインに結合する RNA アプタマーの取得と解析, 平成 26 年度日本生化学会関東支部例会, 2014 年 6 月, 茨城, ポスター
- iii) Ryo Amano, Yusuke Nomura, Takashi Nagata, Naohiro Kobayashi, Yoko Mori, Kenta Takada, Junichi Fukunaga, Yoichiro Tanaka, Masato Katahira, Yoshikazu Nakamura, Tomoko Kozu, and Taiichi Sakamoto, Properties of RNA aptamer binding to AML1 Runt domain, XXI Round Table on Nucleosides, Nucleotides and Nucleic Acids, 2014 年 8 月, Poznan (ポーランド), ポスター
- iv) Kenta Takada, Ryo Amano, Takashi Nagata, Masato Katahira, Yusuke Nomura, Yoichiro Tanaka, Yoshikazu Nakamura, Tomoko Kozu and Taiichi Sakamoto, NMR analysis of the interaction between an artificial RNA and a transcription factor, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, 2014 年 9 月, 宇治, ポスター
- v) 高田健多, 天野亮, 田中陽一郎, 永田崇, 片平正人, 中村義一, 神津知子, 坂本泰一, 急性骨髄性白血病の原因タンパク質 AML1 に対する RNA アプタマーの取得と解析, 第 4 回 CSJ 化学フェスタ, 2014 年 10 月, 船堀, ポスター
- vi) Kenta Takada, Ryo Amano, Yoichiro Tanaka, Takashi Nagata, Masato Katahira, Yoshikazu Nakamura, Tomoko Kozu, Taiichi Sakamoto, Characterization of RNA aptamer targeting the DNA binding domain of AML1 protein, The 41th International Symposium on Nucleic Acids Chemistry, 2014 年 11 月, 北九州, ポスター
- vii) 高田健多, 天野亮, 永田崇, 片平正人, 野村祐介, 田中陽一郎, 中村義一, 神津知子, 坂本泰一, AML1 Runt domain と RNA アプタマーの相互作用の NMR 解析, 第 37 回日本分子生物学会年会, 2014 年 11 月, 横浜, ポスター

DNA-有機色素複合体を利用した 光・エネルギー変換システム

山名一成¹, 高田忠雄¹, 森井 孝²

¹兵庫県立大学工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

ナノスケールで機能性色素が組織化された構造体は、効率的かつ方向性を持った電荷輸送を可能にすることから、光応答デバイスや分子エレクトロニクスへの応用が期待されている。その中で、化学修飾や組織化によって機能性色素の集積・配列を可能とする DNA は、優れた分子材料として有望視されている。すなわち、DNA 構造を基盤として、光吸収、電子輸送機能を担う機能性色素分子を組織化することで、高効率な光エネルギー変換システムや光反応システムの構築が可能となると期待できる。蛍光分子やレドックス応答分子を修飾した DNA は、バイオセンサーや DNA チップのプロブとして応用可能であり、これまでに様々な機能性修飾核酸が開発されてきた。通常、核酸修飾はホスホロアミダイト法を用いた化学合成によって行われるが、テンプレート配列に応じて多重修飾が可能なポリメラーゼ伸長反応を用いた方法が近年注目されている。

本研究では、光酸化還元を有する分子を導入した修飾核酸塩基三リン酸体を用い、テンプレート配列に対応した修飾核酸塩基の配列選択的な導入を試みるとともに、作製した機能性核酸の光電変換特性についての評価を行った (図 1)。デオキシウリジン三リン酸体をベースとして、ウリジンの 5 位に、アセチレンを有するリンカー(L)を介して機能性分子としてアントラキノン(AQ)およびナフタルイミドを導入した修飾三リン酸体(dUTP^{AQ}, dUTP^{NI})を合成した。修飾 dUTP を用いてポリメラーゼ反応を行うことでテンプレート DNA の配列情報に基づいた機能分子の導入を行い、ポリアクリルアミドゲル電気泳動法を用いてその伸長反応効率を調べた。金表面に固定したプライマーとテンプレート DNA を用いて、ポリメラーゼ伸長反応を行うことで、電極表面上に機能性色素分子を組織化した DNA フィルムを作製し、その光応答特性を調べた。

機能性分子修飾三リン酸誘導体の合成は、アミノ基を有する dUTP と活性エステル基を持つ機能性分子との縮合反応によって行った (図 2)。反応後、逆相 HPLC で精製を行い、ESI-MS によって

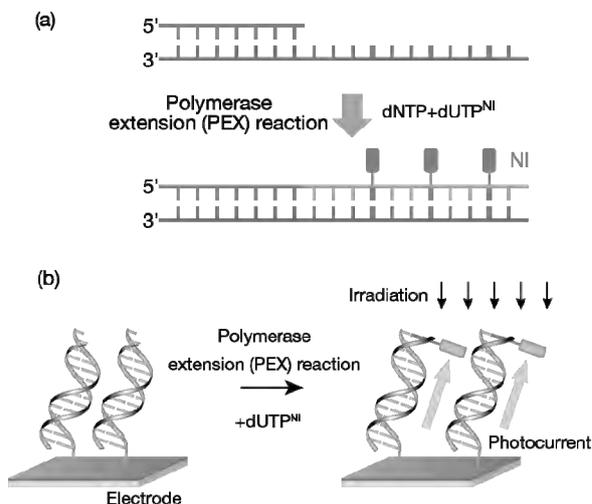


図 1. (a) ポリメラーゼ伸長反応を利用した機能性色素導入 DNA の合成。(b) 機能性色素修飾 DNA

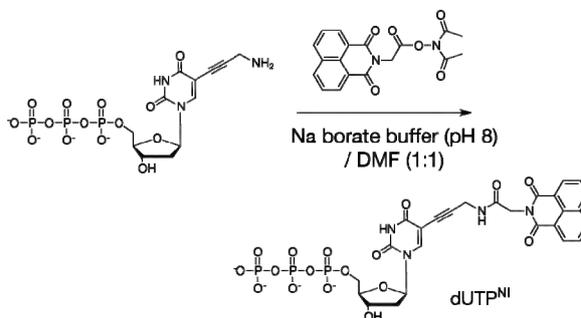


図 2. クロモフォアを導入した三リン酸誘導体の合成

同定を行い、高収率で目的とする誘導体の合成に成功した。合成した三リン酸誘導体を用いたポリメラーゼ伸長反応を、ポリアクリルアミドゲル電気泳動法(PAGE)を用いて調べた(図3)。蛍光色素をラベルしたプライマー(P1)を用い、 $dUTP^{NI}$ の取り込み数が異なるテンプレート(T1, T2, T3)を用いて、ポリメラーゼに KOD Dash, Vent(exo-)を用いて反応を行った。いずれのテンプレートにおいても完全伸長反応生成物に対応する電気泳動バンドが観測され、期待通りテンプレートの A の位置に対して、 $dUTP^{NI}$ が導入されること、すなわちポリメラーゼ反応によって機能性色素分子を DNA に複数導入できることが分かった。

次に、金電極上に固定したプライマー/テンプレートを基にしたポリメラーゼ反応を行い、機能性色素を導入した DNA フィルムの作製と、光応答特性を調べた(図1b)。 $dUTP^{NI}$ を基質としてポリメラーゼ反応を行った後、ナフタルイミド(NI)の光吸収波長である 340 nm の光を電極に照射して応答を調べたところ、光照射によって電流が生じることが示された(図4a)。NI が光を吸収して近傍核酸塩基との間で電荷分離反応が起こり、それによって電流が生じたと考えられる。また、光電流強度は表面 DNA 修飾密度に依存することが分かった。ポリメラーゼ伸長反応の配列依存性を利用して、光電流応答型センサーとしての応用性を調べた(図4b)。一塩基のみ伸長するテンプレート配列を用い、隣接塩基(X)の配列を変えた時の光電流変化の観測を行った。X が T の場合は、マッチ配列であるために $dUTP^{NI}$ が取り込まれるため光電流応答が観測されたのに対して、ミスマッチとなる X が A, G, C の場合は光電流がほとんど生じないことが分かった。ポリメラーゼ反応の配列依存性を利用することで、一塩基配列を光電流で読み出せることが分かった。

本研究では、ポリメラーゼ伸長反応を利用した機能性分子修飾 DNA の合成と光電流応答を示す DNA フィルムの作製を行った。また、光電流によって塩基配列を読み出すセンサーとしての応用が可能であることが示された。

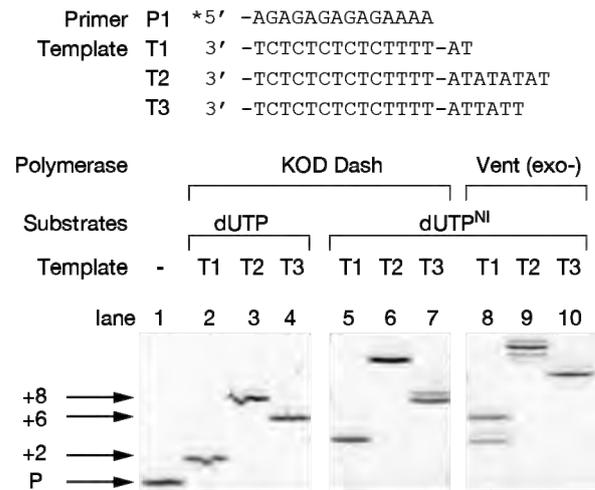


図3. $dUTP^{NI}$ を用いたポリメラーゼ反応の電気泳動結果

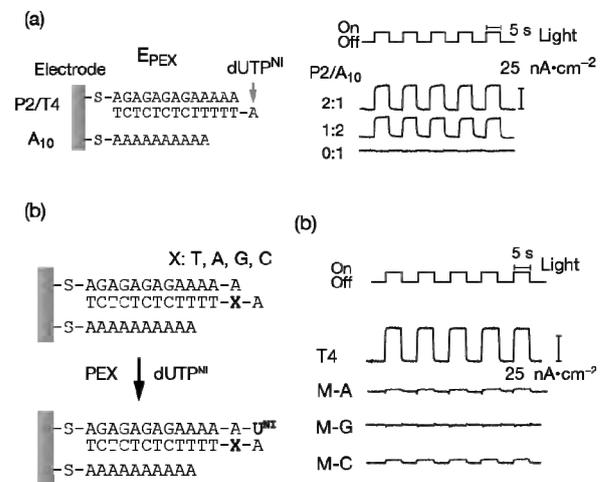


図4. (a) ポリメラーゼ反応を用いた光応答性 DNA 修飾電極の作製。(b) 光電流応答を用いた遺伝子センサー

バイオマスの高度利用に向けた細胞壁リグニン

超分子構造の ^{13}C 標識を利用した NMR 解析

野村健太¹, 寺島典二², 松下泰幸¹, 青木 弾¹, 西村裕志³, 渡辺隆司³,
片平正人⁴, 福島和彦¹

¹名古屋大学大学院生命農学研究科, ²名古屋大学名誉教授, ³京都大学生存圏研究所,
⁴京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的および背景

細胞壁の異なる形態領域では、リグニン構成単位の組成は異なり、それによりリグニンの化学構造も異なることが知られている。寺島らのマイクロオートラジオグラフィーを用いた研究から、H核が複合細胞間層に存在し、高頻度の縮合型構造の形成に寄与することが示唆された。本研究では、H核のDHPへの取り込みが、縮合型構造形成やDHPの分子量分布に与える影響の検証を目的とした。細胞壁リグニンの構造が明らかとなれば、利用に向けた新規な化学変換法の開発およびバイオマス由来新規機能性物質の創製に繋がる。

2. 実験

芳香環5位を ^{13}C 標識した (ring5- ^{13}C -enriched : G-5- ^{13}C) コニフェリン、非標識 (unenriched : UE) コニフェリンおよび *p*-グルコクマリルアルコールといったモノリグノールグルコシドに、 β -グルコシダーゼ、グルコースオキシダーゼおよびペルオキシダーゼを作用させて以下の4種類のDHPを合成した。括弧内に使用した基質の割合 (モル比) を示す。Goringら(1982)は、針葉樹の複合細胞間層リグニンにH核が40%程度存在することを示している。この結果をもとに、本研究ではGH-DHPの基質の割合をコニフェリン / *p*-グルコクマリルアルコール : 6 / 4 とした。

G-DHP-[UE] (Coniferin-[UE] : 100)

GH-DHP-[UE] (Coniferin-[UE] / *p*-Glucocoumaryl alcohol-[UE] : 60 / 40)

G-DHP-[G-5- ^{13}C] (Coniferin-[UE] / Coniferin-[G-5- ^{13}C] : 90 / 10)

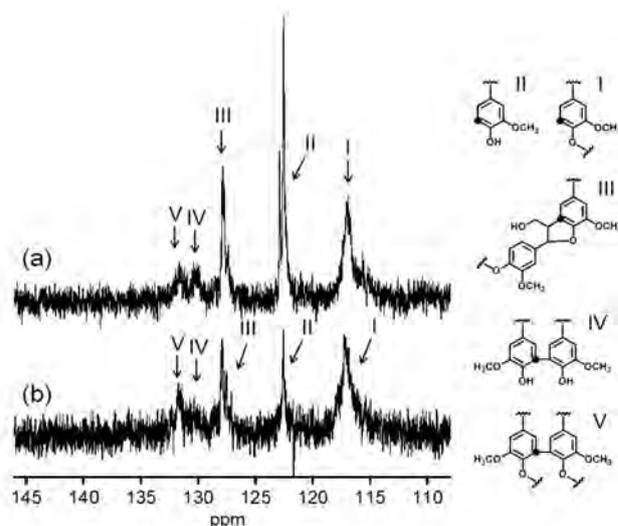
GH-DHP-[G-5- ^{13}C] (Coniferin-[UE] / Coniferin-[G-5- ^{13}C] / *p*-Glucocoumaryl alcohol-[UE] : 54 / 6 / 40)

これらのDHPの ^{13}C NMRを測定した。 ^{13}C 標識DHPのスペクトルから非標識DHPのスペクトルを差し引いた示差スペクトルから、G核5位の結合様式を定量した。またG-DHPとGH-DHPのチオアシドリシス、GPC分析を行い、化学構造と分子量の比較を行った。

図1 NMR 示差スペクトル

(a) : G-DHPの示差スペクトル

(b) : GH-DHPの示差スペクトル



3. 結果

3.1 ^{13}C NMR 分析

図1はG-DHP、GH-DHPの示差スペクトルである。この示差スペクトルはメトキシ基のピークを消去するように差し引いている。ピークは図1に示すように帰属した。今回は、G-DHP、GH-DHPともに ^{13}C 標識コニフェリンを全コニフェリン量の10%の量だけ使用している。そのため各ピーク面積を、差し引く前のメトキシ基のピーク面積で除することにより、G-DHP、GH-DHP間での各結合様式の形成頻度の比較を可能にした。

表1からG-DHPと比較してGH-DHPにおいて、IやVといったG核のエーテル化した構造が増加し、IIやIVといったG核のフリーフェノールの構造が減少していることが分かる。この結果から脱水素重合の際にH核が存在する場合、DHP分子鎖が伸長する傾向、もしくはH核が末端基として取り込まれる傾向があることが示唆される。

表1 ピークの帰属とピーク面積比

label	ppm	assignment	Peak area / methoxy peak area	
			G-DHP	GH-DHP
I	115.8–118.0	uncondensed etherified substructure	1.30	1.58
II	121.8–123.1	uncondensed phenolic substructure	1.31	0.48
III	126.9–130.8	β -5' phenylcoumarane substructure	0.83	0.63
IV	129.1–130.8	5-5' biphenyl substructure	0.35	0.30
V	130.8–132.4	5-5' etheryfied biphenyl substructure	0.35	0.48

3.2 GPC 分析

図2にGPCクロマトグラムを示す。黒色がG-DHP、灰色がGH-DHPのクロマトグラムである。G-DHPと比較してGH-DHPでは、42.5分あたりのピークが大きくなり、44.5分あたりのピークが小さくなっていることが分かる。このことから、脱水素重合の際、H核が存在することで高分子量DHPが増加することが明らかとなった。

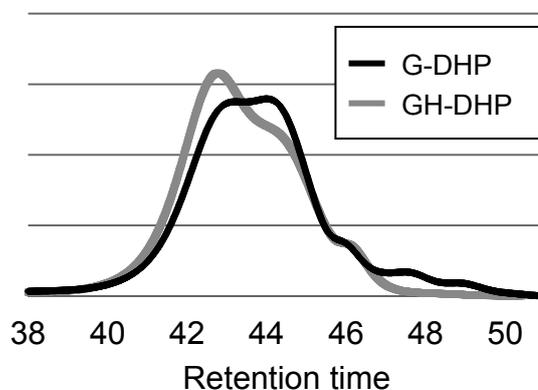


図2 GPCクロマトグラム

4. 結論

^{13}C NMR、GPC分析の結果から、脱水素重合の際H核が存在することによって、G核のフェノール性末端基へのG核もしくはH核の付加が促進され、DHPの高分子化につながることを示唆された。

5. 成果発表[口頭発表リスト]

1) 野村健太, 寺島典二, 松下泰幸, 青木弾, 西村裕志, 渡辺隆司, 片平正人, 福島和彦, “*p*-ヒドロキシフェニル核の存在とリグニン分子構造との関係”, 第65回日本木材学会大会, 2015年3月16日~3月18日, 東京, タワーホール船堀

核融合炉第一壁およびダイバータ材料中の水素同位体滞留・透過挙動に及ぼす高温照射の影響

波多野雄治¹，網 恭平¹，古井 良¹，登尾一幸¹，アリモフ ウラジミール¹，近藤創介²，檜木達也²

¹富山大学水素同位体科学研究センター

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 諸言

核融合炉ブランケットから効率的に増殖トリチウム (T) を回収すると共に、事故時の T 放出を防ぐには、構造材料およびアーマー材料中の T 滞留量および透過速度を正確に把握し設計に反映すると共に、これらを低減する必要がある。このような観点から、多くの構造材およびアーマー材候補材料について水素同位体の溶解度や透過率が測定されている。しかし、核融合環境下ではアーマー材および構造材は中性子照射を受ける。中性子照射により材料中に空孔や転位等の欠陥が形成されると、これらが水素同位体に対する捕捉サイトとして働き滞留量が増大すると共に、実効的な拡散係数が減少するはずである。しかし、ほとんどデータがないのが現状であり、著者らの知る限りでは日米科学技術協力事業 TITAN 計画において 50°C 付近で中性子照射されたタングステン (W) 中の重水素 (D) 滞留量が測定されているのみである[1]。中性子照射実験は必要不可欠であるが、大きな予算が必要であり、かつ照射と誘導放射能の冷却に長期間を要するため、事前に重イオン照射による加速試験を実施し、中性子照射を行うべき条件を十分に絞り込む必要がある。

本研究の目的は、アーマー材候補である W および構造材候補である低放射化フェライト鋼に材料試験装置 DuET を用いて重イオン照射を行い、形成される水素同位体捕捉サイトの密度、および水素同位体-捕捉サイト間の結合エネルギー等の照射量および照射温度に対する依存性を明らかにすることである。今年度は、我が国で開発された低放射化フェライト鋼 F82H 鋼に 6.4 MeV の Fe イオンを照射し、照射後の D 捕捉を調べた。

2. 実験

試料には F82H 鋼の板材を用いた。表面を鏡面に研磨したのち、DuET を用いて 250°C にて 6.4 MeV の Fe イオンを 0.02~2.5 dpa (displacement per atom) まで照射することで、深さ約 1.8 μm の領域まで照射損傷を導入した。次いで、200 および 300°C において 0.1 MPa の D₂ ガスに曝露したのち、照射欠陥に捕捉された D の深さ方向濃度分布を核反応法により分析した。すなわち、0.69~4.0 MeV の ³He イオンを試料に照射し、D(³He,p)⁴He 反応で生成する陽子および ⁴He のエネルギー分布より D 分布を評価した。それぞれの条件で 2 個ずつ試料を調製し再現性を確認した。なお、核反応法による分析はマックス・プランクプラズマ物理研究所 (ドイツ) との共同研究として実施した。

3. 結果および考察

図 1 に 0.02~2.5 dpa まで Fe イオンを照射した F82H 鋼および非照射材中の D の深さ方向分布を示す。非照射材では表面極近傍 (深さ 500 nm 以下の領域) でのみ D が検出され、バルク中にはほとんど D が存在していない。この表面近傍の D には、酸化膜中に捕獲された D も含まれていると考えられる。0.02 dpa 照射すると深さ約 4 μm までの領域で非照射材に比べ D 濃度が明確に増大しており、照射欠陥

の捕捉効果が現れていることがわかる。興味深いことに、Fe イオンの飛程（約 $2\ \mu\text{m}$ ）より深部まで D 濃度が高い領域が広がっているが、これはイオン照射で導入された欠陥が深部へ拡散していることを示している。照射量を $0.1\ \text{dpa}$ まで増大させると、 200°C での捕捉 D 濃度が $0.1\ \text{at.}\%$ まで増加すると共に、より深部まで欠陥が拡散している。一方で、 300°C における D 濃度は一桁以上低い値（ $\sim 10^2\ \text{at.}\%$ 以下）になっている。これは捕捉-脱捕捉の平衡が 300°C では大きく脱捕捉側へ移動したためであり、捕捉サイトと D の結合エネルギーはそれほど大きくないと考えられる。データのばらつきはあるものの、 $0.5\ \text{dpa}$ 以上に照射量を増加させても D の深さ方向分布には大きな変化は見られない。すなわち、照射温度 250°C においては D 捕捉に及ぼす照射効果が $0.1\ \text{dpa}$ 程度で飽和することがわかる。W の場合は同様の条件下で 600°C においても $0.3\ \text{at.}\%$ の D 捕捉が見られており[1]、F82H 鋼での照射効果は W と比べるとはるかに弱いものである。ただし、原型炉で使用される低放射化フェライト鋼の総量は W と比べ桁違いに大きいので、低濃度でも捕捉する T の総量は大きくなる可能性もあり慎重な検討が必要である。

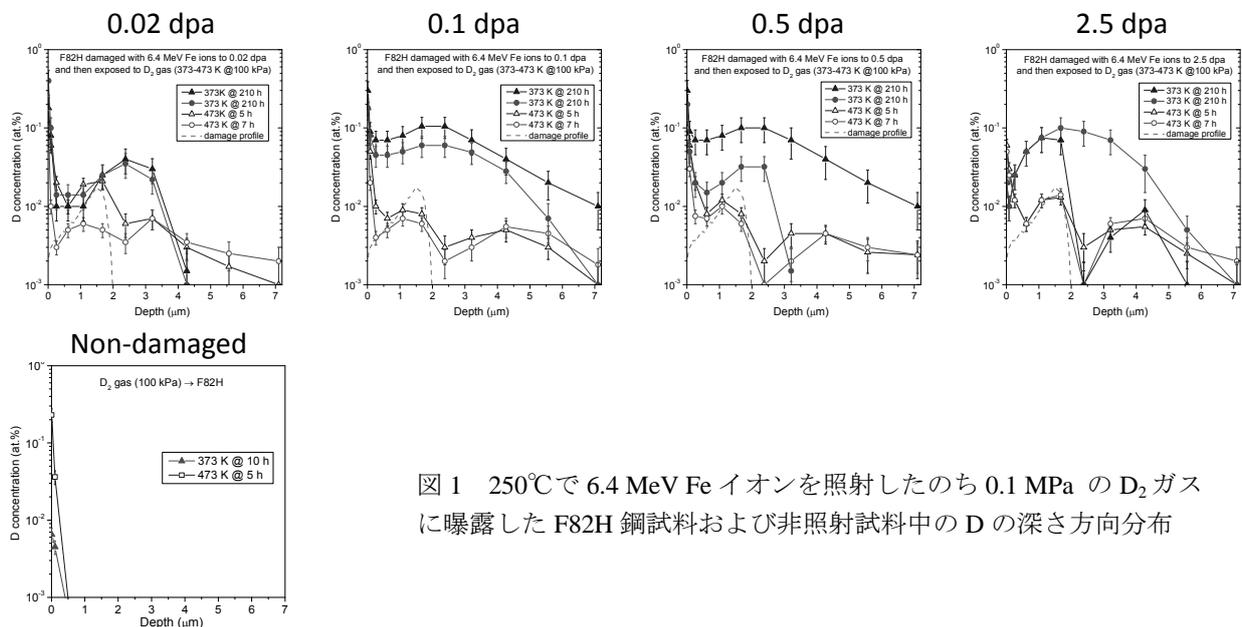


図1 250°Cで6.4 MeV Fe イオンを照射したのち0.1 MPaのD₂ガスに曝露したF82H鋼試料および非照射試料中のDの深さ方向分布

4. まとめ

低放射化フェライト鋼 F82H に DuET を用いて 250°C で高エネルギーFe イオンを照射し、導入された照射欠陥による D 捕捉を調べた。照射欠陥による捕捉効果で D 濃度は 250°C では約 $0.1\ \text{at.}\%$ まで増大したが、 300°C では一桁程度減少した。また、照射効果は $0.1\ \text{dpa}$ で飽和傾向を示した。F82H 鋼で見られた照射効果は W と比べ著しく弱いものであった。

参考文献

[1] Y. Hatano et al., J. Nucl. Mater., **438**(2013)S114–S119.

[口頭発表リスト]

Y. Hatano, V. Kh. Alimov, K. Noborio, K. Sugiyama, S. Kondo, T. Hinoki, "Influence of High Temperature Irradiation on Deuterium Retention in Reduced Activation Steel for Fusion Reactors", The 5th International Symposium of Advanced Energy Science ~Contribution to Zero-Emission Energy~, Sep. 30–Oct. 2, 2014, Uji, Japan. (Poster)

高フルエンス水素プラズマ－タングステン材料相互作用による原子空孔での多重水素捕獲・熱放出過程の研究

加藤太治¹, 中筋俊樹², 森下和功²

¹核融合科学研究所ヘリカル研究部

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

ITER ではタングステンダイバータの使用が計画されている。タングステンを用いた核融合炉の先進プラズマ対向材料での水素吸蔵・再放出特性に対する中性子照射の影響は、原子空孔によるものが大きいと考えられている。最近の研究により、高フルエンスの水素プラズマ照射を受けた場合に、タングステンの単原子空孔は複数の水素原子と強く結合しクラスタを形成することが理論的に予測されており、中性子照射材の水素吸蔵・再放出特性に与える影響を評価するためにも、水素クラスタの熱力学的な安定性、および水素原子の捕獲・熱脱離の非平衡過程を定量的に明らかにする必要がある。

プラズマ照射下の材料内部の格子欠陥と水素原子の結合状態を実験的に同定することは困難である。照射後であっても水素のような軽元素を検出できる方法は限られているうえ、水素原子は容易に金属格子間を通りぬけるため試料温度が上昇すると分布が変化しやすい。また、実験的に制御することが難しい不純物の影響や、試料中の欠陥特性に関する知見の不明確が大きい。よって本研究は、タングステン中の空孔－水素クラスタの熱力学量や熱分解過程、及びこれらが照射タングステン材の水素吸蔵・再放出特性に与える効果を、第一原理計算に基づいて理論的に解明することを目的として行った。本研究の特長は、経験的なパラメータを全く用いてないため、第一原理から水素捕獲サイトの特性を研究できる点にある。

2. 研究方法

2.1 密度汎関数理論による第一原理計算

密度汎関数理論に基づく第一原理計算コード VASP を用いて計算を行った。本研究では、Perdew-Burke-Ernzerhof 型の一般化勾配近似による交換・相関エネルギー汎関数を用い、タングステン原子 1 個あたり 6 個の価電子 ($5d^46s^2$) のみ陽に取り扱い、残りの内殻電子の影響は擬ポテンシャル法の一つである Projector-Augmented-Wave (PAW) 法を用いて近似した。54 個のタングステン原子から成る周期境界条件付きの格子に単原子空孔と水素原子を配置し、対応する逆格子空間の第一 Brillouin ゾーンを $4 \times 4 \times 4$ の Monkhorst pack グリッド (k 点) でサンプリングして、与えられた原子配置での電子状態を計算した。

2.2 空孔－水素原子分解過程の最低エネルギー経路と遷移状態の探索

空孔と水素原子の分解過程の最低エネルギー経路と経路上の遷移状態 (ポテンシャルリッジ) の探索には、始状態と終状態の間に 8 つのイメージを配置した Nudged-Elastic-Band (NEB) 法を用い、個々のイメージの構造緩和計算は擬ニュートン法や共役勾配法を用いて行った。なお本計算には、研究代表者所属機関の Message Passing Interface (MPI) 並列計算機を使用した。

3. 結果と考察

図 1 に、格子間水素原子、単原子空孔 V、原子空孔に束縛された水素原子クラスタ (VH_n) を含むタングステン bcc 格子の統計熱力学モデルを用いて計算したクラスタ熱平衡濃度の温度依存性を示す。 VH_n の結合エネルギーと振動エネルギーは VASP を用いた第一原理計算により求めた。温度が 500 K を下回ると、大きなクラスタの濃度が支配的になる。500 K より高温照射の場合には、いったんクラス

タ濃度は減少を示し、熱空孔濃度とは異なる温度依存性を示す。

図2は、クラスタから分解に必要な水素原子の最小エネルギーと遷移状態を、VHとVH₆の二つの場合で示している。いずれも、最小エネルギー経路の途中に準安定状態が存在するが、水素原子の熱脱離速度への影響は無視できるほど小さいことが理論解析の結果分かった。遷移状態理論により、クラスタからの水素原子の昇温脱離速度を計算した結果、それぞれのクラスタに対応する脱離速度のピークが得られる(図3)。本計算では、初期状態の各クラスタ濃度として熱平衡濃度を仮定し、各クラスタ濃度の連立速度方程式を一定の昇温速度で数値的に解いた。脱離速度には大きく2つのピークが確認できる。高温側のピークはVHとVH₂からの熱脱離によるもので、低温側はそれよりも大きなクラスタからのものである。この2つのピークは実際の昇温脱離スペクトルでも確認されており、本理論モデルがおおむね妥当であることを示している。実験と比較すると、ピーク温度が低温側にずれているが、これは本モデルでマトリクス中の水素原子の輸送を無視したためと考えられる。

4. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

[1] D. Kato et al., "Multiple hydrogen trapping by vacancies and its effects on defect dynamics", J-US workshop on Heat Removal and Plasma-Materials Interactions for Fusion, 2014年6月4-5日, 京大宇治キャンパス

[2] D. Kato et al., "Super-saturated hydrogen effects on radiation damages in tungsten under high-flux divertor plasma irradiation", 25th IAEA Fusion Energy Conference, 2014年10月13-18日, St. Petersburg (ロシア) (ポスター)

[3] D. Kato et al., "Multiple hydrogen trapping by vacancies: its impact on defect dynamics and hydrogen retention in tungsten", Joint ICTP-IAEA Conference on Models and Data for Plasma-Material Interaction in Fusion Devices, 2014年11月3-7日, Trieste (イタリア)

[論文発表リスト]

[4] D. Kato, K. Morishita et al, "Super-saturated hydrogen effects on radiation damages in tungsten under high-flux divertor plasma irradiation", Nucl. Fusion (投稿中)

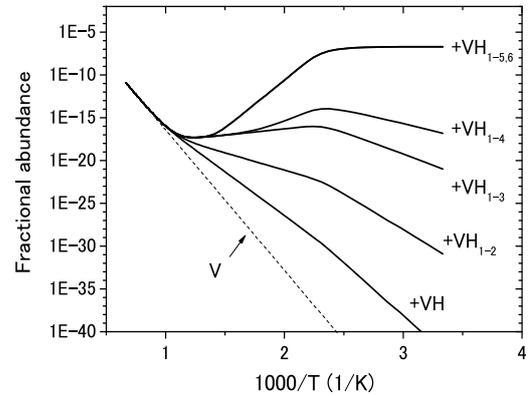


図1 タングステン原子空孔と結びついた水素原子クラスタ VH_nの熱平衡濃度 [4]. タングステンマトリクス中の水素濃度 H/W を 10⁻⁶ と仮定した場合の結果. 点線は熱空孔濃度.

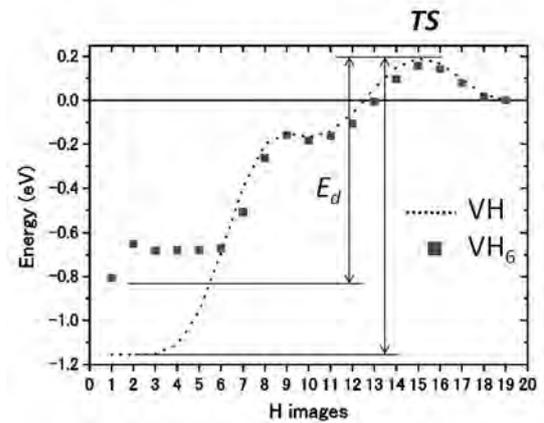


図2 VH_nから脱離する水素原子のエネルギー変化. 四面体格子間位置でのエネルギーを基準に取っている. TS:遷移状態. E_d:脱離エネルギー.

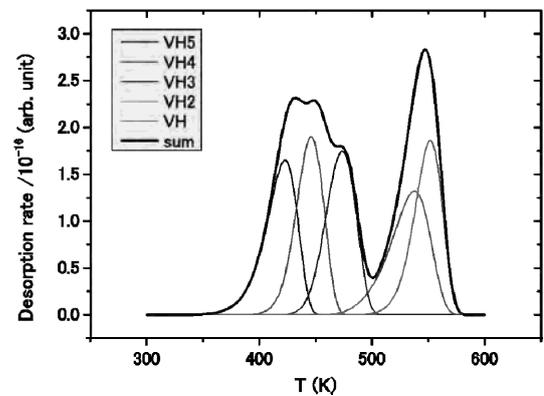


図3 VH_nからの水素原子の昇温脱離速度.

二酸化炭素をアルコールに酵素変換する ポリマーハイブリッドナノファイバーの開発

田中直毅¹, 和久友則¹, 森井 孝²

¹京都工芸繊維大学生体分子工学部門, ²京都大学エネルギー理工学研究所

目的

ギ酸脱水素酵素、アルコール脱水素酵素、ホルムアルデヒド脱水素酵素を組み合わせることで、常温常圧下において省エネルギー的に二酸化炭素をアルコールに変換できることが示されている。我々はこれまでに、リン脂質ポリマーのフィルム中に物理固定した緑膿菌由来のホルムアルデヒド脱水素酵素 (FDH) によって気相中のアルデヒドをアルコールに変換できることを報告した^[1]。フィルム中の FDH はジスムテーションにより補酵素 NAD⁺を消費することなく、アルデヒド 2 分子を 1 分子の酸とアルコールへと変換することを見出した。さらに酵母由来のアルコール脱水素酵素 (ADH) も類似した機構でアルデヒドをアルコールに変換することを見出した。昨年度はこの方法を二酸化炭素のアルコール変換に応用することを目的として、酵素をポリビニルアルコール (PVA) に配合して効率的に反応を行う系を探索した。その結果 PVA とポリビニルピロリドン (PVP) を混合し電界紡糸によってナノファイバー化することによって迅速なアルデヒド処理が可能であることが示された。

本年度は新たに酸化還元酵素を過剰発現する酵母を設計して、二酸化炭素をアルコール変換利用することを試みた。酵母の FDH1 はギ酸脱水素酵素^[2]であり、Sfa1 はアルコールとホルムアルデヒド脱水素反応を触媒する 2 機能性酵素である^[3]。これらの酵素の遺伝子を同一の酵母へ形質転換することで、3 種の酵素活性を増幅した酵母を作製した (Fig. 1)。

結果

1. FDH1 および Sfa1 の遺伝子クローニング

FDH1 遺伝子^[2]のクローニングはプロモーター-GAGTTT を含む Forward プライマーとターミネーター-TAATTG を含む Reverse プライマーを用いた PCR により行った。Sfa1 配列のクローニング用プライマーは、上流 700 bp、下流 300 bp に存在するプロモーター-CTCGTT、ターミネーター-AACGAG を含む配列を利用した。FDH1 は EcoRI を用いて pRS423 (His⁻) プラスミドに、Sfa1 は Xho I を用いて pRS426 プラスミド(Ula⁻)にそれぞれクローニングした。これらのプラスミドを大腸菌によって増幅し、制限酵素切断を電気泳動により確定することで挿入を確認した。以上の操作によって得られたプラスミドを用いて、W303 酵母への形質転換を行った。

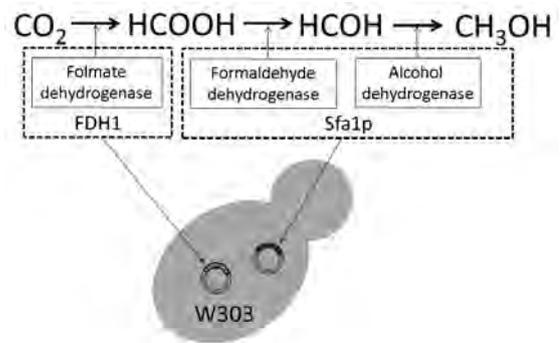


Fig. 1. Over-expression of FDH1 and sfa1 in W303

2. W303 酵母において過剰発現した FDH1、Sfa1 の活性測定

FDH1 を組み込んだ pRS423 プラスミドと Sfa1 を組み込んだ pRS426 プラスミドを W303 酵母に形質転換した。この酵母株を SD 培地(グルコース+水+窒素源 Ula⁻ His⁻)中で 48~72 時間培養を行い、濁度が 1 を超えた時点で培養を停止した。得られた酵母の細胞膜をファストプレップ(1500 mV)によって破碎した後、上澄みの蛋白質濃度が一定になるように調整して、ギ酸脱水素酵素とホルムアルデヒド脱水素酵素の活性を測定した。 K_m より充分高い濃度のギ酸、ホルムアルデヒド、 NAD^+ を基質として、 $NADH$ の生成を 340 nm の吸光度からモニターした。

Fig. 2 に FDH1 および Sfa1 を過剰発現した酵母 W303 の、ギ酸脱水素酵素とホルムアルデヒド脱水素酵素の活性を示す。過剰発現しない酵母 W303 のギ酸脱水素酵素活性(Fig. 2 上)はホルムアルデヒド脱水素酵素 (Fig. 2 下) の 1%程度であった。ギ酸脱水素酵素活性は FDH1 単独過剰発現によって向上したが、Sfa1 の過剰発現によっても同程度向上した。したがって Sfa1 の過剰発現は酵母 W303 のギ酸脱水素酵素活性に関わる酵素発現に影響を与えることが示唆された。このことは Sfa1 と FDH1 の共発現によってギ酸脱水素酵素活性も FDH1 単独よりも向上している結果からも示された。さらに FDH1 および Sfa1 の共発現はホルムアルデヒド脱水素酵素活性にも同様の影響を示した (Fig. 2 下)。以上の結果から

FDH1 および Sfa1 はともに酵母のギ酸脱水素酵素活性とホルムアルデヒド脱水素酵素に協同的に作用することが判った。今後はストレス化で培養を行うことで過剰発現量を増幅して酵素活性の高い酵母を作製するとともに、その酵母破碎液を気相中の二酸化炭素の酵素変換に利用する研究を行う。

文献

- [1] Tanaka, N. *et al.*, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **1** 228 (2009)
- [2] Overkamp M. K. *et al.*, *Yeast* **19**, 509 (2002)
- [3] Laukel M. *et al.*, *J. Biochem.* **270**, 2 (2003)

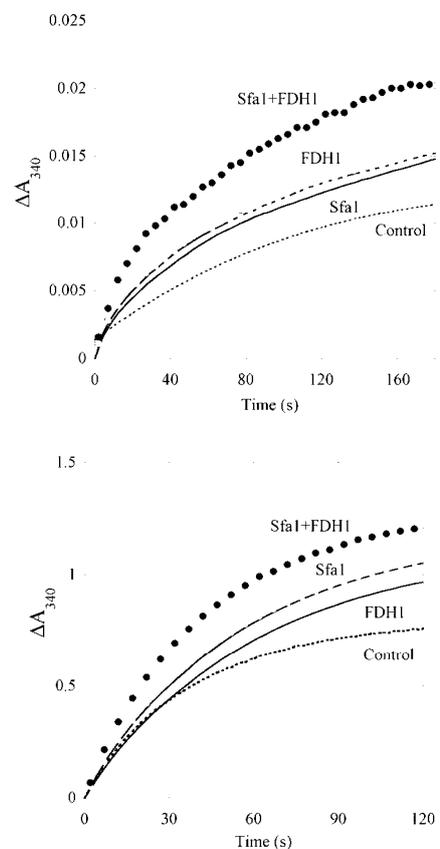


Fig. 2. Enzyme activity of pRS423-Sfa1 and pRS423-FDH1 from yeast. Upper; Folmate dehydrogenase activity, lower; alcohol dehydrogenase activity.

低放射化フェライト鋼－ODS 鋼異材接合材の機械特性

長坂琢也¹, 付海英², 木村晃彦³, 近藤創介³, 橋富興宣³, 大村高正³

¹核融合科学研究所ヘリカル研究部

²総合研究大学院大学物理科学研究科

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

酸化物分散強化 (ODS) 鋼は低放射化フェライト鋼よりも高温強度に優れるので、高温動作可能な核融合炉ブランケットの構造材料として期待されている。一方で、大規模製造技術の確立に課題がある。そこで、ブランケットの大部分を低放射化フェライト鋼で製作し、高温部分のみ ODS 鋼で保護する構造にすることができれば、ODS 鋼の使用量を最小限にしつつ、ブランケットの運転温度があげられるため、高効率の核融合発電炉の実現性が高まる。本研究では、このようなブランケット製作に必要な低放射化フェライト鋼－ODS 鋼の異材接合材の開発に取り組む。溶接及び固相拡散接合で異材接合材を試作し、その接合強度を評価する。接合強度に及ぼす接合条件と試験温度の影響を明らかにする。接合材の使用限界を明らかにするとともに、接合強度向上のための指針を得る。

2. 実験方法

表 1 に接合材の試作に用いた低放射化フェライト鋼 JLF-1 及び分散強化鋼 9Cr-ODS の化学分析結果を示す。JLF-1 における最終熱処理は 1050°C×1 h の焼きならし後空冷、さらに 780°C×1 h の焼き戻し後空冷であり、9Cr-ODS では 1050°C×1 h の焼きならし後空冷、さらに 800°C×1 h の焼き戻し後空冷である。9Cr-ODS は直径 24 mm×5 mm のディスク状試料に加工し、これを直径 24 mm×20 mm の 2 個の JLF-1 ブロックで挟み密着させ、軟鋼の容器に電子ビーム溶接で封入した。封入前の試料を図 1(a)に示す。封入後の試料には高温静水圧プレス (Hot isostatic pressing: HIP) を施し接合材を試作した。HIP 条件は圧力 191 MPa、温度は 1000、1050 または、1100°C、時間は 3 h である。HIP 後の接合材断面のマクロエッチング写真を図 1(b)に示す。マクロ欠陥は観察されなかった。HIP 後の接合材の母材の機械特性変化を回復させるために、接合後熱処理 (Post-weld heat treatment: PWHT) を行った。接合後及び PWHT 後の機械特性を硬さ試験及び引張試験で評価した。

表 1 低放射化フェライト鋼 JLF1 及び分散強化鋼 9CrODS の化学分析結果 (mass %)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	W	V	Ta	Ti	Y	O	N
JLF-1	0.090	0.05	0.49	<0.003	0.0005	9.00	1.98	0.20	0.083			0.002	0.015
9Cr-ODS	0.14	0.06	0.09	<0.005	0.004	9.08	1.97			0.23	0.29	0.16	

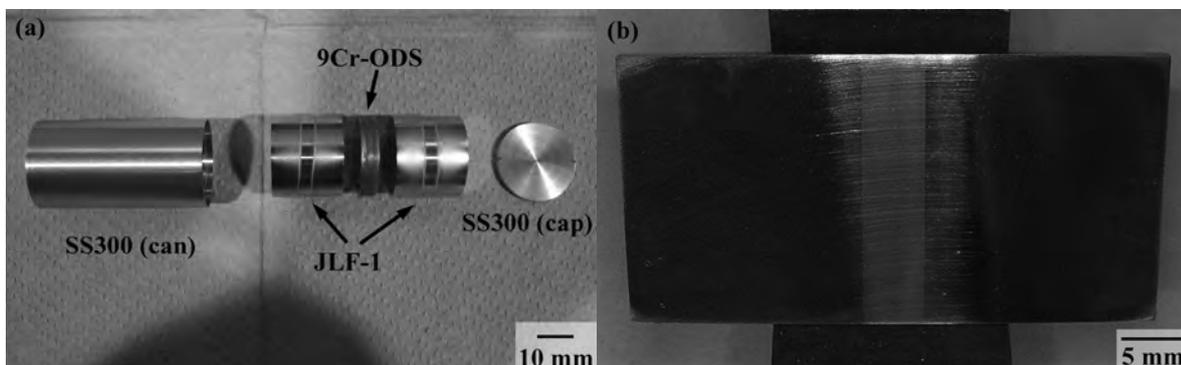


図 1 (a) 電子ビーム溶接による封入前の試料及び(b) HIP 接合後の接合材断面のマクロエッチング写真

3. 結果と考察

図2に1000°CでHIP接合前 (before HIP)、接合後 (as-HIPed) 及びPWHT後 (その他) の母材の硬さを示す。HIP処理によりJLF-1は硬化し、9Cr-ODSは軟化した。これはHIP処理における冷却速度が装置保護のために大きくとれず5°C/minに留まったため、JLF-1においては冷却速度が十分な急冷にあたって焼きが入るのに対し、9Cr-ODSでは冷却速度が足りないために焼きが入らなかったことが原因である。9Cr-ODSの鋼中に分散されたナノ粒子が焼きの原因であるマルテンサイト変態と粒界の移動を抑制しているためと考えられる。HIP接合後に、焼きならしを1050°C、1hrで行い、35°C/minで冷却した。これにより9Cr-ODS鋼の強度は回復した。さらに延性を向上させるための焼き戻しを780°Cで行ったところ、JLF-1、9Cr-ODSいずれにおいても強度は接合前のレベルに回復した。さらに高温の800°CではJLF-1の結晶粒粗大化が認められたため、1050°C×1hの焼きならし、さらに780°C×1hの焼き戻しを接合後熱処理の標準条件とした。

室温及び550°Cの引張試験における破断位置は接合界面またはJLF-1母材であった。接合界面で破断した場合には、破断強度を接合強度と見なすことができる。表2に引張試験で得られた接合強度と破断界面の絞りを示す。1000°CでHIPした接合材では、接合強度がJLF-1の最大引張強さ(610MPa)より小さく、PWHT後も回復しなかった。界面のJLF-1側には幅1µm程度の炭化物が消失した軟化層が観察された。引張試験においてこの軟化層に変形が集中した結果界面には大きな応力が発生し、低荷重で破断したことが接合強度低下の原因と考えられる。この条件では継ぎ手としての伸びはほぼゼロであり、絞りも小さかった。一方、1050°Cまたは1100°CのHIP条件では接合強度が大きく改善された。これは前述の軟化層に他の領域から炭素が十分拡散し軟化を補ったことが原因と考えられる。1050°Cで絞りが大きくなっているのは、接合界面付近の変形がより均一になったためと考えられる。1100°Cで再び絞りが小さくなった原因については現時点では不明であり、接合界面付近のより詳細な微細組織観察を今後予定している。

表2 引張試験で得られた接合強度及び破断界面の絞り

HIP temp.	Condition	Test temp.	Joint strength	RA
1000°C	as-HIPed	RT	518 MPa	7.3%
	PWHT	RT	372 MPa	9.8%
1050°C	as-HIPed	RT	1200 MPa	39%
	as-HIPed	550°C	819 MPa	43%
1100°C	as-HIPed	RT	1140 MPa	15%
	as-HIPed	550°C	755 MPa	15%

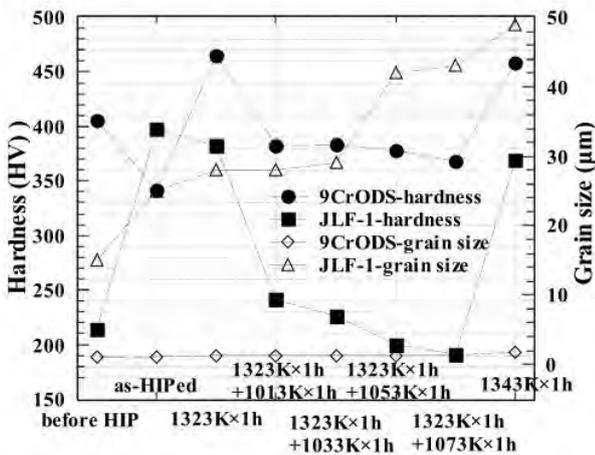


図2 1000°CでHIP接合後及び接合後熱処理後の母材の硬さ

4. 本年度 発表リスト

[論文発表リスト]

[1] H. Y. Fu, T. Nagasaka, T. Muroga, A. Kimura, J. M. Chen, Microstructural characterization of a diffusion-bonded joint for 9Cr-ODS and JLF-1 reduced activation ferritic/martensitic steels, Fusion Engineering and Design, Vol. 89, 2014, pp. 1658-1663.

省エネルギー型発光素子用材料の設計と開発

清水正毅¹, 坂口浩司²

¹ 京都工芸繊維大学工芸科学研究科

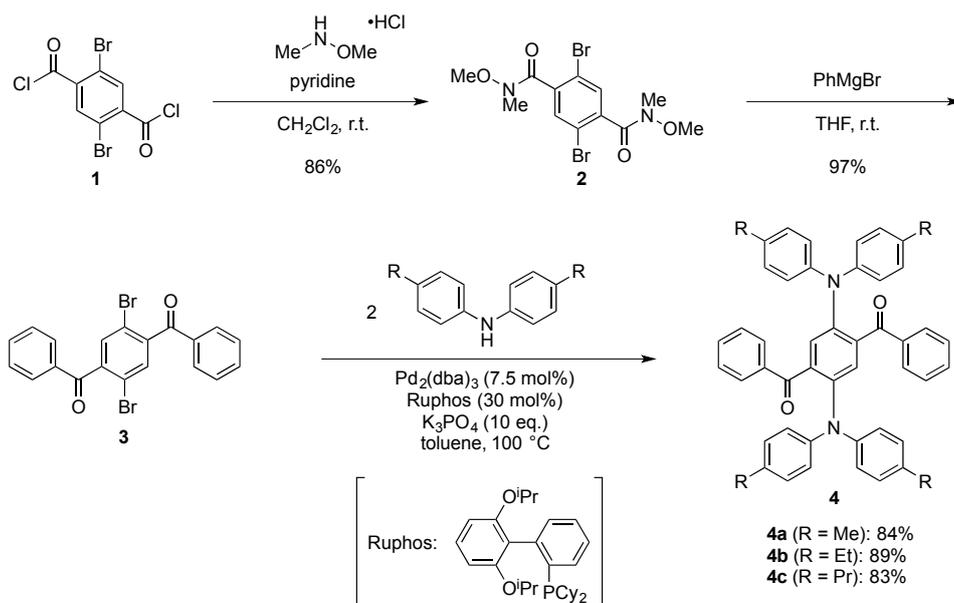
² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

有機 EL ディスプレイは、自発光、高速応答、薄型、広視野角、低電圧駆動、高輝度、高視認性など表示デバイスとして理想的な特徴を数多く有している。また、バックライトを光源とする液晶ディスプレイがカラーフィルタを使って光源からの発光の一部しか利用していないことを考慮すると、有機分子の自発光を礎とする有機 EL 素子の電力効率は液晶のそれをはるかに上回る。また有機 EL 素子を光源とする照明機器は、極薄、軽量、フレキシブル、面発光光源などの無機 LED とは異なるポテンシャルを有し、さらに白熱灯より高い電力効率、蛍光灯に必要な水銀が不要などの環境に優しい特徴を備えている。したがって、有機 EL 素子の革新はゼロミッションエネルギーに直結する重要課題の一つである。有機 EL 素子は固体素子なので、発光材料には固体状態で高効率発光することが求められる。これまでに我々は、2,5-ジアミノ-1,4-ビス (アロイル) ベンゼンが固体状態において黄色から深赤色の蛍光を良好な量子収率で発することを見つけている。このビス (アロイル) ベンゼンの発光色および発光効率は、その固体形状に大きく依存することも認めている。そこで、今回窒素上フェニル基のパラ位置換基をメチル、エチル、イソプロピルと代えて、固体発光特性がどのように変化するかについて検討を行った。

2. 2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼンの合成

スキーム 1 に、2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼン **4** の合成法を示す。まず、ジブロモテレフタル酸二塩化物 (**1**) にメトキシメチルアミンの塩酸塩をピリジン存在下反応させることにより、対応するワインレップアミド **2** を調製した。これにフェニルグリニャール反応剤を 2 当量作用させて、2,5-ジブromo-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼン (**3**) を合成し、これに Buchwald らの条件を用いてジアリールアミンをカップリングさせることにより、目的とする **4** を得た。



スキーム 1. 2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼン **4** の合成

3. 2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼンの光物性

トルエン溶液の紫外・可視吸収および蛍光発光と結晶ならびに粉末の蛍光発光に関するデータを表 1 にまとめた。トルエン溶液の紫外可視吸収スペクトルの吸収極大波長およびモル吸光係数と蛍光スペクトルの発光極大波長および発光量子収率は、**4a-4c** はほぼ同じであった。すなわち、個々の分子が孤立している溶液中では、アミノ基上フェニル基の 4 位に置換するアルキル基の違いは光物性にはほぼ影響を与えないことがわかる。それに対して、固体状態の発光特性はアルキル基の炭素数が一つ変わるだけで顕著に変化することが明らかになった。例えば、アルキル基がメチル基である **4a** の微結晶 (テトラヒドロフラン/メタノール混合溶媒系より再結晶にて調製) は量子収率 0.47 で濃い赤色発光 (発光極大波長 650 nm) するのに対し、エチル基体 **4b** の微結晶は発光スペクトルが短波長化して橙色発光する。また、量子収率は 0.66 に向上した。プロピル体 **4c** の微結晶では、さらに短波長化した発光が観測され、量子収率 0.76 で緑色蛍光 (発光極大波長 528 nm) を観測した。このように、アルキル基が長くなるにつれて、微結晶状態では発光スペクトルが大きく短波長シフトすることを見出した。一方、粉末状態の発光挙動について見てみると、メチル体 **4a** およびエチル体 **4b** では発光極大波長はほぼ 610 nm であったのに対し、プロピル体 **4c** の発光極大は 640 nm へと長波長シフトした。現在のところ、X 線構造解析に適した **4a-4c** の単結晶の作成には成功していないが、粉末状態と微結晶が異なる発光挙動を示したことは、粉末状態の分子凝集構造と結晶のそれらとが異なっていることを示していると考えている。

表 1 2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼン **4** の光物性

4	Absorption		Fluorescence					
	Solution ¹⁾		Solution ¹⁾		Crystal ²⁾		Powder ³⁾	
	λ_{\max} (nm)	ϵ (M ⁻¹ cm ⁻¹)	λ_{em} (nm)	Φ	λ_{em} (nm)	Φ	λ_{em} (nm)	Φ
4a	461	2200	623	0.16	650	0.47	610	0.30
4b	461	2300	622	0.13	604	0.66	609	0.45
4c	464	2300	630	0.14	528	0.76	640	0.32

1) In toluene. 2) Prepared by recrystallization from THF/MeOH solution. 3) Prepared by evaporation of THF solution.

さらに興味深いことに、**4c** の発光特性は熱や溶媒蒸気などの外部刺激により変化することを見つけた。すなわち、赤色発光する **4c** の粉末をテトラヒドロフランの蒸気に晒すと、その粉末は緑色発光を呈するようになり、その発光スペクトルを測定すると、**4c** の微結晶の発光スペクトルと一致した。また、テトラヒドロフラン蒸気に晒した緑色発光性の粉末を 200 °C に加熱すると、その発光スペクトルは赤色発光に戻った。

以上、2,5-ジアミノ-1,4-ビス (ベンゾイル) ベンゼンの固体発光特性は、アミノ基上フェニル基のパラ位アルキル基の炭素数が異なるだけでも大きく変化すること、そして、外部刺激に応答して変化することを明らかにした。

[口頭発表リスト]

Masaki Shimizu and Hiroshi Sakaguchi, “Design and Development of Functional Organic Materials for Energy Conservation-Directed Light-Emitting Devices”, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science-Contribution to Zero-Emission Energy-, September 30, 2014–October 2, 2014, Uji, Poster Presentation.

低放射化フェライト鋼および ODS 鋼の 照射下相安定性に関する機構論的研究

阿部弘亨¹, 叶野 翔², 大場 彰², 近藤創介³, 木村晃彦³

¹ 東北大学金属材料研究所, ² 東北大学大学院工学研究科, ³ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

核融合炉は、二酸化炭素の放出が極端に少なくゼロエミッション社会を達成し得る開発途上のエネルギー源であり、核融合炉工学分野においては構造材料の性能向上が大きな課題となっている。特に第一壁ブランケットでは、高エネルギー中性子によるはじき出し損傷および核変換生成物 (He, H) の材料特性への影響が懸念されている。核融合中性子環境での照射実験が困難であることから、DuETをはじめとしたイオン加速器は環境模擬実験として重要な位置づけを持つ。

本研究では、低放射化フェライト鋼の機械特性について、特に照射硬化挙動や脆化挙動に着目し、He や H の注入効果及びそれらとはじき出し損傷との重畳効果についてイオン加速器を用いて調査し、データベースを構築することを目的とする。今年度は昨年度に引き続き F82H 鋼モデル合金を作製し、これに対してイオン照射実験を行い、微細組織観察を行った。

2. 実験方法

アーク溶解法で作製した Fe-TaC 試料に対して熱処理を施し、F82H 鋼とほぼ同程度の TaC 粒径分布を持つモデル鋼を作製した。また、Fe-Ta-C 試料を同様に作成した。これは母相に固溶する C の影響を見るための比較材料である。これらから 3mm φ のディスク状試料を切り出し、機械研磨、電解研磨を施し照射試料とした。この試料に対し 6.4 MeV Fe³⁺ イオンを損傷速度 5×10^{-4} dpa/s、温度 400°C にて 5dpa まで照射した。損傷分布は SRIM コードにより評価し、損傷ピークは深さ約 1.5μm であった。照射後の試料は、サンプリング機能付集束イオンビーム加工装置 (FB-2100) により照射表面に垂直な断面試料を作製し、TEM (JEM2100FX) を用いて微細組織観察した。

3. 結果および考察

非照射材に対する予備観察で得られた組織を図 1 に示す (H25 報告書再掲)。非照射の Fe-Ta-C 合金と Fe-TaC 合金の TEM 写真である。Fe-Ta-C 合金では 1523K×24hrs の均質化処理後炉冷によりディスク形状の TaC 析出物が母相中に高密度に分散した組織を有した。これに対して 1523K×24hrs の均質化処理後に 1123K×1hr の焼鈍により (b) に示すような粒状析出物に性状が変化した。

これらの、Fe-TaC 合金と Fe-Ta-C 合

金の組織の差異が超微小硬さに及ぼす影響を照射量依存性として図 2 に示す。照射前で比較すると、単純な組織を有する Fe-TaC 合金が相対的に硬度が低かった。イオン照射により、いずれの試料も照射硬化を示すが、Fe-TaC では単調増加に近い傾向を示したのに対して、Fe-Ta-C 合金では 1 dpa までの照射により硬さが急激に増加しその後緩やかに増加する傾向を示した。

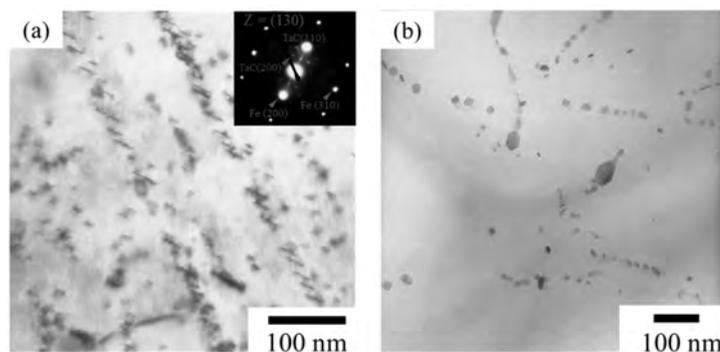


図 1. モデル合金の微細組織

(a) Fe-Ta-C 合金, (b) Fe-TaC 合金

さらに照射前後の析出物のサイズ変化について調査した(図3)。Fe-Ta-C合金(a)では照射前の析出物平均サイズは29nmであったが、1dpa照射により21nmに収縮した。同様にFe-TaC合金(b)でも、照射前24nmが照射後21nmであった。このことは、照射による析出物の収縮と消滅を意味しており、これはこれまでの当研究グループにおける超高压電子顕微鏡内照射実験の結果と整合している。しかしサイズ変化の度合いだけでは図2の硬さのデータを説明できない。これは析出物の形状の影響を考慮する必要があることを示唆している。そこで比較的単純な三次元構造を仮定して、単位照射量あたりの析出物体積分率の変化率として整理したところ、粒状析出物はディスク状析出物よりも2倍程度収縮速度が高く、析出硬化が減じる影響が出やすいことが分かった。

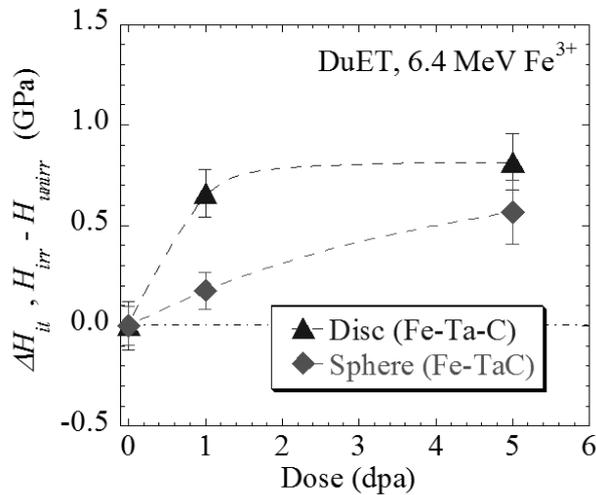


図2. イオン照射したFe-Ta-CならびFe-Ta-C合金における超微小硬さの照射量依存性

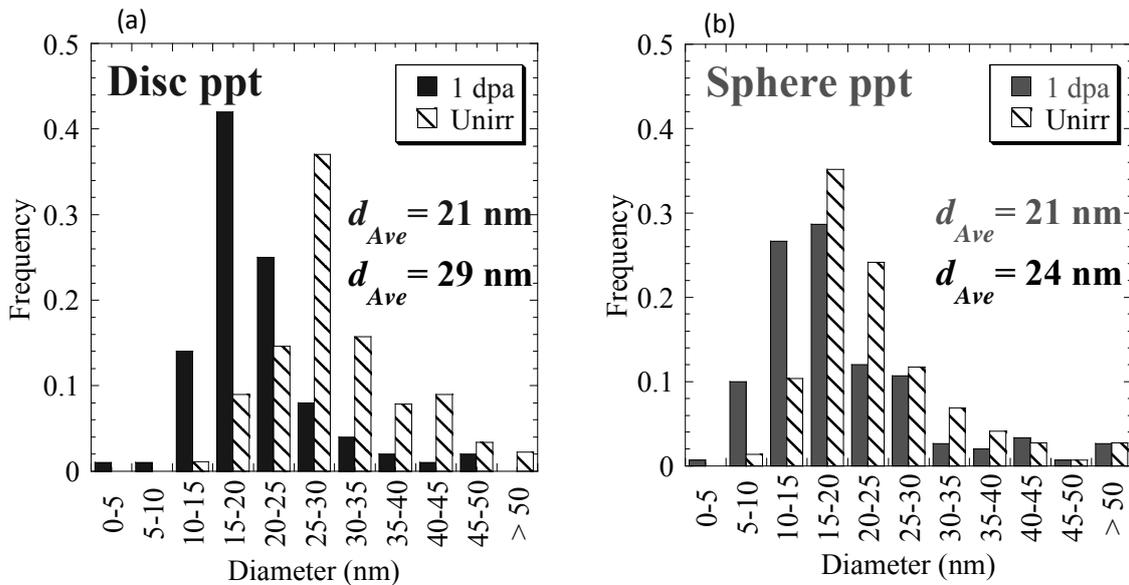


図3. 非照射および1dpa照射した合金中の析出物サイズ依存性
(a) Fe-Ta-C合金、(b) Fe-TaC合金

低放射化核融合炉材料の重照射効果に関する研究

谷川博康¹, 小沢和巳¹, 近藤創介², 檜木達也², 森貞好昭³, 藤井英俊³

¹ 日本原子力研究開発機構

² 京都大学エネルギー理工学研究所

³ 大阪大学接合科学研究所

1. 背景と目的

低放射化フェライト鋼 (F82H) は、核融合原型炉のブランケット構造材料の第一候補材であり、原子力機構 (JAEA) では幅広いアプローチ (BA) 活動を中心とした開発を進めてきている。核融合炉構造材料開発における最大の課題は核融合中性子照射場が現存しない点である。このため、14MeV 核融合中性子照射効果を調べるには、2 重イオン照射などの模擬照射実験の利用が主となる。加速器を用いたイオン照射実験は、損傷速度が高く核融合炉環境に比べて加速照射となるが、照射条件を制御しやすく、重照射が比較的簡単に達成できる点で有利である。本研究ではこの特徴を生かしつつ、核融合ブランケット第一壁のもっとも重照射を受ける領域について、そのボイドスウェリング挙動の解明と抑制手法の可能性の検討をすすめている。

本年度では、摩擦攪拌処理 (FSP) された F82H の耐スウェリング性について評価を行った。すなわち、プラズマ対向材としてプラズマ真空溶射 (VPS) タングステン (W) を F82H 鋼第一壁表面に施工することが考えられているが、VPS-W は空孔率が高く熱伝導率が低いという欠点がある。この欠点を解消すべく VPS-W を FSP 強化する手法が提案され、VPS-W の空孔率の低下、熱伝導率の回復、強度の向上を達成している。この VPS-W の FSP 強化時に、基盤である F82H も深さ 2mm にわたって FSP 処理され、細粒化する。今年度は、この FSP 処理された F82H のボイドスウェリング挙動について調べることを目的として、多重イオンビーム照射実験及びマイクロ組織観察による評価を実施した。

2. 実験方法

供試材として用いたのは、FSP 強化した 2mm 厚さの VPS-W の基盤として用いられた F82H 鋼 IEA ヒート (Fe8Cr2WV Ta) である。FSP 条件は、600 rpm、50 mm/min、2 ton×2 回である。この材料より、元の表面に対して垂直に 1.5 mm×7 mm×0.25 mm¹ の大きさの短冊片を切出し、機械研磨後、電解研磨にて仕上げた。すなわち短冊試験片の長辺の一方が表面側 (VPS-W との界面側) となる。イオン照射実験は、エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター設置の複合ビーム・材料実験装置 DuET を利用して行った。デュアル照射は 6.4 MeV Fe³⁺イオン+1.0 MeV He⁺イオンにて行い、ヘリウムビームについてはエネルギーディグレッダーを利用して、試験片の中央部に行った。照射条件は、ボイドスウェリングの顕著な 470 °C 付近で、50dpa 6.86×10⁻⁴ dpa/s とした。なおヘリウムの注入量は核融合環境を考慮し、15 appmHe/dpa にて調整した。照射後試験は、青森県六ヶ所村にある日本原子力機構国際核融合エネルギー研究センター内原型炉 R&D 棟に設置された集束イオンビーム (FIB) 加工装置 (FB-2100) にて、30 μm×15 μm 四方のマイクロ組織観察用薄膜試験片を作成した後、低エネルギースパッタ装置 (GENTLE MILL) にて観察薄膜表面をクリーニングし、200 kV 透過電子顕微鏡 (JEM-2100F) にてマイクロ組織観察を行った。

3. 結果と考察

図 1 は、a)F82H IEA 材 および b)FSP 処理を受けた F82H IEA 材 (FSPed-F82H) における、470 °C、50 dpa デュアル照射材から得られたマイクロ組織写真である。F82H 鋼ではいずれの条件においても照射表面から約 0.2~1.0 μm の領域で数 nm のヘリウムバブルと 10~20 nm のボイドからなるキャビティ組織の形成が確認された。F82H IEA 材では 10nm 弱程度の小さなボイドが高い数密度で観察された。一方、FSPed-F82H 照射材においては、表面直下の FSP 処理の影響を強く受けた箇所では、数 nm 程度のバブルが高い数密度で観察された (図 1 b)。

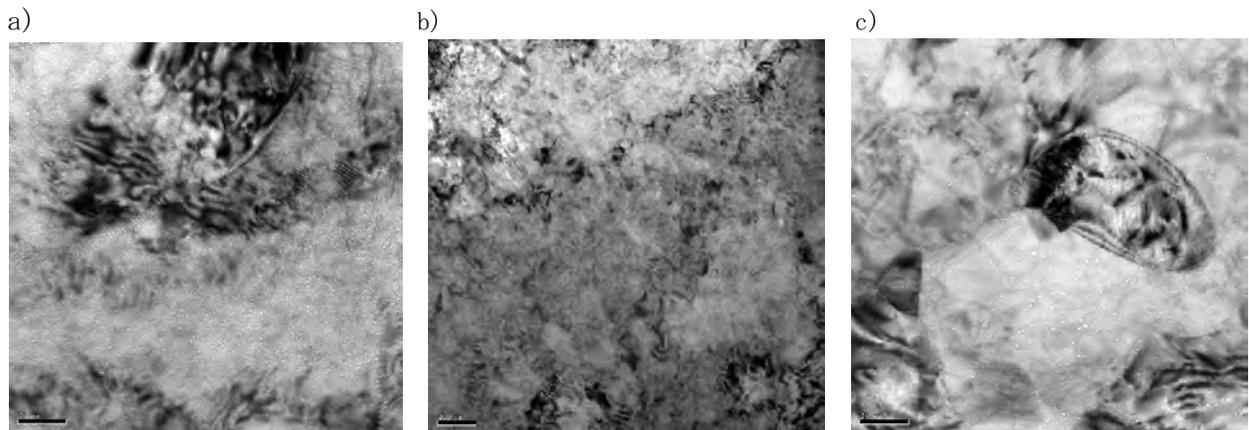


図1 470 °C、50 dpa デュアル照射された F82H 鋼の TEM 明視野像 (吸収コントラスト)。
a) F82H IEA、b), c), FSPed-F82H-IEA (異なる FSP 箇所から)

一方、表面より 2mm はなれた、FSP 処理の影響が少ない箇所では、比較的低い数密度のボイドが観察された。この結果は、FSP 処理により激しく攪拌された組織を示す F82H 基盤部分が、通常の F82H に比べより良好な耐スウェリング性能を示す可能性が示唆される。すなわち、VPS-W をプラズマ対向材として第一壁 F82H 表面に施工し、VPS-W の強化目的で FSP 処理を施した場合、その基盤部分となる第一壁最表面側の F82H は、ブランケットで使われる F82H において最も重照射を受ける箇所となるが、FSP 処理を同時に受けることによりその箇所の耐スウェリング性を向上できる可能性が示唆された。また、FSP 処理の影響が弱い箇所では、攪拌そのものの効果が弱くなり、強攪拌部ほどの耐スウェリング性は示さないものの、攪拌時の熱入力による熱履歴が結果として FSP 処理を受けていない F82H と異なるスウェリング挙動を示すにいたったと考えられる。

今後は、定量的評価をすすめる熱処理によって回復された場合の照射応答などの詳細な評価をすすめていくとともに、低い損傷量でのスウェリング挙動を比較し、詳細なスウェリング挙動の解明をすすめる予定である。

4. まとめ

プラズマ対向材の VPS-W を FSP 強化した際に、同時に FSP 処理をうける基盤表面部分の F82H 鋼について 470°C50dpa の多重イオンビーム照射実験を実施し、マイクロ組織観察による評価を行った結果、FSP 処理が耐スウェリング性を向上できる可能性を示唆する結果が得られた。

5. 発表リスト

[口頭発表リスト]

今年度は該当なし。次年度以降に予定。

高速増殖炉被覆管材における FP 腐食に対する アルミナ被膜の化学的安定性

福元謙一¹，山村一貴²，佐々木孔英³

¹ 福井大学附属国際原子力工学研究所

² 福井大学工学部、³ 福井大学工学研究科/JAEA 敦賀

1. 緒言

原子力発電の中でも高速中性子を用いることで、発電しながら消費した以上の核燃料を生み出すことができる高速増殖炉の実用化が求められている。実用化に向け経済性向上のため燃料ピンの高燃焼度化が提案されている。しかし、燃料ピンの高燃焼度化が進むことで腐食性核分裂生成物（以下、「腐食性 FP」という。）により、燃料被覆管（燃料を装荷するサヤ管）が腐食することが報告されている。これは、燃料-被覆管化学的相互作用（FCCI : Fuel-Clad Chemical Interaction）として知られており、FCCI を抑制・緩和することが高燃焼度化を進める上で極めて重要であるとされている。現在、考えられている腐食性 FP には Rb, Cs, I, Br, Se, Te, Cd が挙げられるが、照射後燃料ピン FCCI 部の元素分析より、その腐食には、セシウム腐食機構、セシウム-テルル腐食機構、ヨウ素輸送機構が関係していると推測されている。そこで、これらの腐食に対する耐食性向上策として「被覆管内面への防食被膜形成」が考えられる。

本研究では、高温酸化環境下で鉄鋼材料表面に安定酸化被膜を形成することで注目されている Al_2O_3 を防食被膜として選定し、アルミナとヨウ素、セシウム、セシウム-テルルとの反応をギブスの自由エネルギー値より検証すると反応しないことを確認する。また耐食性向上策の提案のため、アルミナ被膜を形成させた試験片に対して腐食試験を行い、試験後もアルミナが安定的に存在するか調査する。

2. 実験

本実験で使用した 12Cr-5Al-Fe 合金はアーク溶解法で作製した。アーク溶解装置は京都大学エネルギー理工学研究所木村研究室のものを使用した。試料形状は 4mm×20mm の板材に加工し、研磨紙 (#180~#2000) と精密研磨シート (#4000~#10000) を用いて研磨した。その試料に対して Al 酸化条件且つ Cr 還元条件下 ($\Delta G_{\text{O}_2} = -880 \text{ kJ/mol} < x < \Delta G_{\text{O}_2} = -560 \text{ kJ/mol}$) で熱処理することで試験片表面に Al 酸化被膜のみを形成させた。セシウム、セシウム-テルル腐食試験装置の概略図を図 1 に示す。アルゴンガスで置換したグローバック内で、腐食試験体を作製し、バッファ材を装荷した石英管に投入した。その後、石英管をグローバックから取り出し、電気炉にセットし、腐食試験を開始した。試験条件は試験温度 650°C で、試験時間は 100 時間である。

ヨウ素腐食試験は純粋な反応を見るため、ヨウ素粉末と試験片とが直接接触れないように石英管に封入し、電気炉にて 650°C×100h の腐食試験を実施した。腐食試験後は試料を取り出し、試料表面のアルミナ被膜と FP 層との境界部を観察するため、SEM で表面を観察し、FIB を用いて TEM 観察試料を作製した。TEM により境界部の観察、化学組成分析を行った。

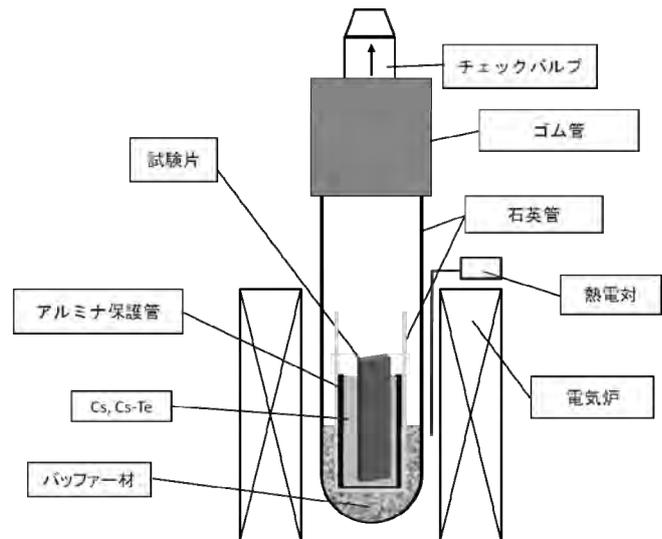


図1 試験装置の概略図

3. 結果及び考察

図 2 にアルミナ被膜処理を実施した 12Cr-5Al-Fe 合金の TEM による BF 像と Al, O の元素マッピング像を示す。図 2 より試験片表面近傍に Al と O により構成された被膜が形成されていることが確認できる。

図 3、図 4 にヨウ素、セシウム腐食試験後の断面観察及び化学組成分析結果を示す。ヨウ素腐食試験後では被膜の成長が見られ、所々にアルミナの剥離が見られた。セシウム腐食試験後では被膜の剥離はなく、成長も見られなかった。ともに、Al, O が試料表面に存在することを確認した。

図 5 にセシウム-テルル腐食試験後の表面 SEM 像と Al, Te の元素マッピング像を示す。セシウム-テルル腐食試験後の SEM 観察では表面に Al の筋のようなものが見られたが、TEM 観察では試料表面にアルミナ被膜の存在は確認できなかった。これは、アルミナはセシウム-テルルと反応しないことが分かっているため被膜の剥離が原因であると考えられる。被膜の剥離については、試験前と試験後のアルミナ被膜の電子回折パターンを比較すると試験前ではアモルファス状であったが、試験後には結晶性が高くなっていることが確認でき、結晶化することによって被膜が剥離しやすくなったと考えられる。

4. 結言

本実験では、腐食性 FP としてヨウ素、セシウム、セシウム-テルルを用いてアルミナ被膜を形成させた 12Cr-5Al-Fe 合金に対して腐食試験を実施した。腐食試験後の試料表面の観察を行ったところヨウ素、セシウムに対してのアルミナの化学的安定性が確認できた。セシウム-テルルに関しては熱力学計算結果と一致しなかったため、今後アルミナ被膜形成した試料を用いたセシウム-テルル腐食試験を実施しアルミナの化学的安定性を確認する計画である。

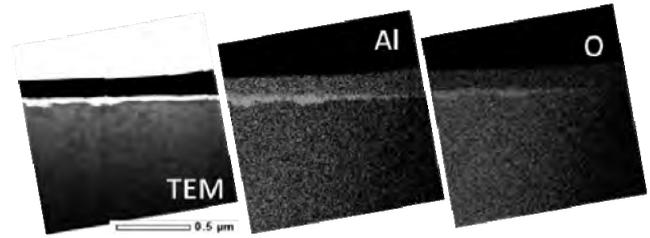


図 2 試料表面の BF 像と Al, O の元素マッピング図

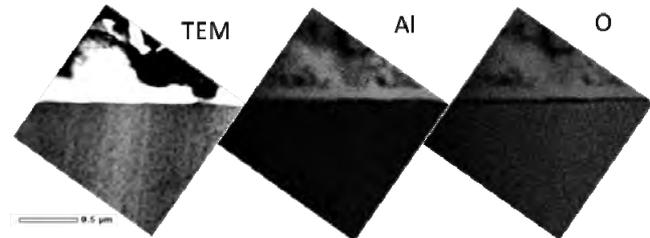


図 3 ヨウ素腐食試験後の試料表面の BF 像と Al, O の元素マッピング図

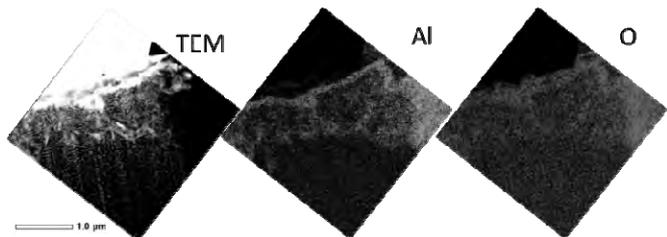


図 4 セシウム腐食試験後の試料表面の BF 像と Al, O の元素マッピング図



図 5 セシウム-テルル腐食試験後の SEM 像と Al, Te の元素マッピング図

先進タングステン合金の耐照射性機構解明に関する研究

長谷川晃¹, 野上修平¹, 藪内聖皓¹, 福田 誠¹, 近藤創介², 木村晃彦²

¹東北大学大学院工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景・目的

核融合炉プラズマ対向材料であるタングstenは、高温下での中性子照射による欠陥の蓄積や核変換によりボイドや照射誘起析出の形成によるボイドスエリングや照射硬化などにより、粒内強度が粒界より大きくなることにより粒界割れの発生による粒界脆化が懸念されている。近年、加工と熱処理さらに合金添加などにより照射欠陥のシンクを導入することで照射欠陥集合体の形成を抑制できることが明らかになってきた。さらに微細な結晶粒配位により粒界の脆化を抑制出来る可能性も示唆されている。本研究では、タングstenの照射硬化挙動及び微細組織発達に及ぼす、添加元素、熱処理、初期組織等の影響を明らかにすることで、耐照射性機構の解明とその有効範囲を明らかにすること目的とする。

2. 実験方法

供試材には、pure W、W-1Re、W-3Re、K-doped W、K-doped W-3Re、La-doped W-3Re の 7 種類を使用した。試料は、3 x 6 x 0.65 mm の試験片に切り出して実験に用いた。

イオン照射は、日本原子力研究開発機構高崎研究所の 3MV タンデム加速器を使用し、18 MeV の W⁶⁺ イオンを、照射温度 500 °C および 800 °C にて、0.2、1.0、5.0 dpa まで照射を行った。損傷量の計算は SRIM2008 を用いた。損傷量計算の結果の例を図 1 に示す。本研究において損傷量は、照射深さ 0.5 μm における損傷量と定義している。

照射後試験片は、Agilent 社製 Nanoindenter G200 および ENT-1100a を用いて硬さを測定した。また、透過型電子顕微鏡を用いて微細組織観察を実施した。

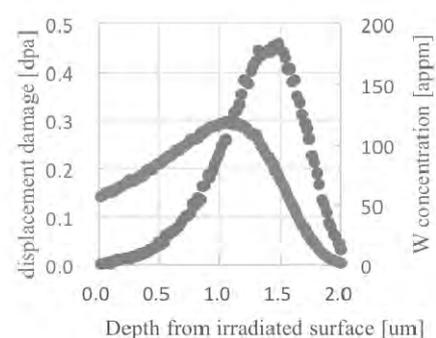


図 1. 損傷量及び W 濃度分布

3. 結果・考察

ナノインデントを用いて試料表面からの硬さを測定する場合、十分な押し込み深さを有する試験（例えばビッカース硬さ試験）に比べて大きな硬さが測定される Indentation Size Effect (ISE) に注意しなければならない。ISE は、圧子自身が押し込まれること材料中に導入される Geometrically Necessary Dislocation (GND) による加工硬化によって説明できるというモデルが Nix, Gao らによって提案されている(以下、Nix-Gao モデル)。Kasada らは、イオン照射材に対して Nix-Gao モデルを適用することで、ISE の影響を除いたバルク相当硬さを導出する試みを進めている。本研究でも、Nix-Gao モデルを適用することにより、バルク相当硬さを導出することとした。このような方法で取得した pure W についての照射前後のナノインデント測定結果を図 2 に示す。照射後のすべての試料で照射硬化が確認された。本研究で実施したイオン照射においては照射温度の違いによる硬さの違いは見られず、照射硬化量の照射温度依存性は見られなかった。また照射硬化量と照射量の関係に着目すると、500°C 照射材、800°C 照射材ともに 1 dpa 以上で照射硬化が飽和していることが分かった。TEM による微細組織観察の結果を図 3 に示す。組織観察の結果より、1 dpa / 500°C 照射材に転位ループとボイドが形成されていることが明らかとなった。1 dpa / 500°C 照射材では、転位ループの数密度は $8.2 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 、直径は約 2.3 nm であり、ボイドの数密度は $7.5 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ 、直径は約 1.4 nm であった。今後中性子照射材との比較を通して W 合金の耐照射性機構を明らかにしていく予定である。

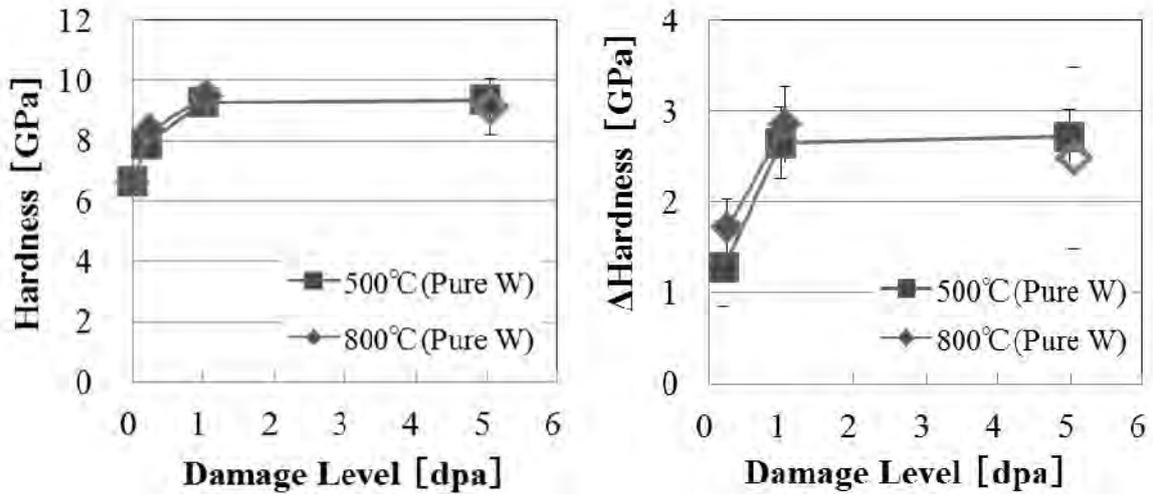


図2 ナノインデンテーション硬さ試験結果

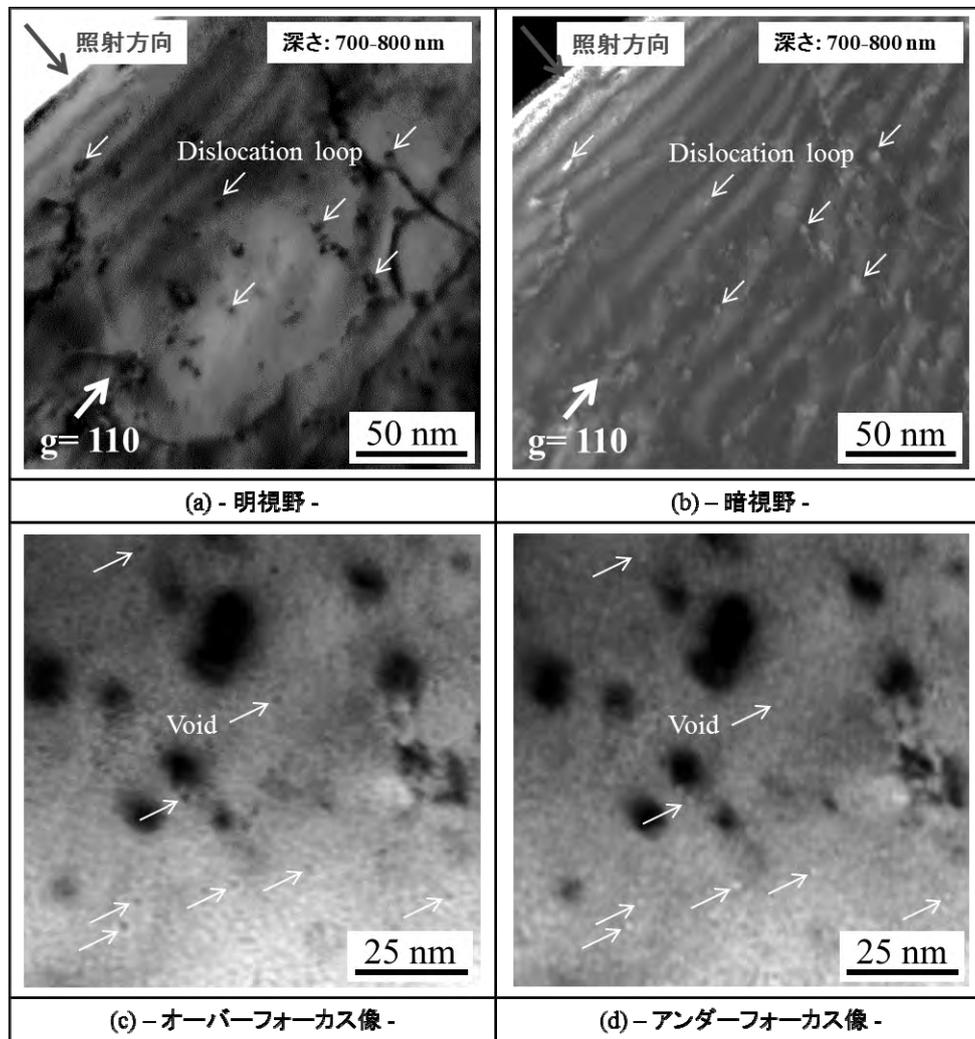


図3 pure W 1dpa/500°C 照射材の TEM 観察結果

4. 発表リスト
なし

核融合炉構造材料中のバブル・ボイド形成に対する 損傷速度とヘリウム生成率の効果

山本琢也¹, 呉源¹, G. Robert Odette¹, 近藤創介², 橋富興宣², 木村晃彦²

¹ University of California Santa Barbara

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

ゼロエミッション社会のエネルギー源の要となる核融合炉の実現に向け、その過酷な使用環境に耐え得る構成材料の開発が急務となっている。特に構造材料中では、高エネルギー中性子による核変換によって大量の He 原子が生成し、結晶粒界へのバブル状析出やボイド形成の促進によって、材料破壊靱性の著しい低下やスウェリングが引き起こされ、材料寿命を左右する一因となっている。材料中の He の挙動は、He 生成量・生成速度、照射損傷量、損傷速度、He 対損傷量比、照射温度などの照射環境条件や材料の微細組織に依存して複雑に変化し、その依存性は、未だ十分に解明されていない。設計条件はもとより、位置、時間によって大きく変化する実際の照射環境における材料中の He 挙動の予測には、系統的に変化させた条件下の He 挙動を実験的に把握し、それらの結果を包括的に記述できる予測モデルを開発することが必要不可欠である。そこで、DuET 装置を利用した Fe-He イオン同時照射実験により、広範な変位損傷及び He 注入条件下でのフェライト系構造材料中の組織変化を明らかにすることが、本研究の目的である。

2. 実験方法

核融合炉構造材候補フェライト鋼 F82H と酸化物分散強化鋼 MA957 と 14YWT について、DuET 装置を用いた Fe イオン(6.4MeV)-He イオン(1MeV)同時照射実験を、500°Cにて実施した。各イオンにより、フェライト系材料中に、約 1.5 μm と 1.1 μm のそれぞれにピークを持つ変位損傷分布と He 注入量分布が得られる。そこで、照射後の試料から、FIB 加工により、深さ 0~2 μm 領域に渡るサンプルを切り出して、透過型電子顕微鏡観察を行い、その深さ方向に 100nm 間隔で区切った領域毎に、キャピティ組織の定量評価を行った。各 100nm 領域での損傷と He 量は、SRIM2008 計算に基づいて評価を行った。図 1 に、本実験における観察領域での変位損傷(dpa)と He 濃度条件マップを示す。図には、核融合炉第一壁条件における典型的な条件 (10~20appm/dpa) や原子炉照射 (HFIR, ATR) やスポレーション装置を利用した高エネルギープロトン照射 (STIP) の照射条件も併せて示した。図が示すように、DuET 照射では、イオン照射に特有な損傷量、He 量の深さ分布を積極的に活用することにより、核融合炉相当の He/損傷比条件を含む非常に広範囲の照射条件での材料挙動を調べる事が可能である。その点での DuET 照射の優位性は際立っている。また、観察された領域での損傷速度は、平均 $8 \times 10^{-4} \text{dps/s}$ であり、これは図に示した他の照射方法に比べると、約 3 桁以上の高い損傷速度となっている。短時間で高い損傷量条件が達成されるという利点がある一方で、損傷速度効果にも注意が必要である。

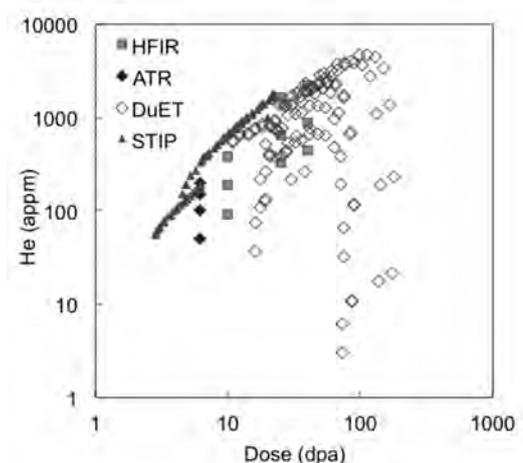


図 1 各種照射実験におけるヘリウム注入量と損傷量条件の比較

3. 実験結果

500°Cでの照射と He 注入後の F82H 中の微細組織では、典型的には、4nm 程度の谷を境に、2~3nm と 5nm 程度のそれぞれにピークを持つ 2 つの分布が観察され、大きなサイズ側の分布は損傷量、He 量が増加するにつれて、より高い数密度で観察された。オーステナイト鋼についての過去の研究

で明らかにされたように、He 原子の集積によって発生したキャビティは、表面張力や照射下の過剰な空孔流入との釣り合いを保持しながら He 量の増加に従って安定に成長するバブルから、ある臨界 He 量と臨界サイズを境に、過剰空孔の流入のみで不安定に成長するポイドに遷移する。上記の 2 ピークがそれぞれバブルとポイドの分布に相当するものと考えられる。その境界は、写真観察のみでは決定できないが、4nm と仮定してそれぞれの部分の平均サイズと数密度を調べると、バブルの数密度は照射量とともに一旦増加した後、ポイドの数密度の増加が始まるとともに、減少する。バブルの平均サイズは、2nm 程度で一定に推移するが、ポイドは 4nm 程度から照射量とともにほぼ直線的に増加する傾向が観察された。バブルの数密度が局所的な微細組織の影響を受けたとみられる強い観察領域依存性を示すのに対し、ポイドの領域依存性は、比較的小さく観察された。そこで、ポイド・スウェリングの指標とも言えるポイドの体積率(f_v)についての解析を行った。

図 2 (a)は、F82H 鋼の IEA 材に見られた照射量依存性を、He 対変位損傷比(He/dpa)10appm 毎に分けて、それぞれにプロットした物である。データに相当なばらつきもある物の最もデータ数の多い 30appmHe/dpa のケースに見られるように、 f_v はある dpa を境に急激に立ち上がる。この閾線量 dpa_i をそれぞれの He/dpa ついてもとてプロットしたものが図 2 (b)である。このように dpa_i には、ほぼ直線的な He/dpa 依存性が見られた。これを元に $dpa - dpa_i$ を新たな照射量パラメータとすると f_v の挙動は、He/dpa によらずほぼ共通の曲線として表される。図 2 (c)は、He/dpa=30 の時の dpa_i (≈ 40 dpa) に揃えて、 dpa' ($= dpa - dpa_i + 40$)を横軸としてプロットしてある。閾線量後のスウェリング挙動がほぼ 0.1%/dpa 程度になっていることがわかる。図に併せて示した白抜きの点は、酸化物分散強化鋼 MA957 についての結果 (但し、ポイドは生成しないので、バブル体積率) である。その高い耐スウェリング性は際立っている。また、NiAl 薄膜を利用した中性子照射下その場ヘリウム注入法による実験結果もクロスライン入りの白抜きの点としてしめす。この場合、閾線量は 5dpa 程度と低い。その閾線量以上での挙動には、共通性が見られる。近い将来に得られる高中性子照射線量での実験結果と併せて、これらの挙動をさらに詳細に比較する予定である。

一方で、最近行った照射速度が 1/3 程度の照射実験においては、同程度の He/dpa、dpa 条件においても、 f_v が著しく低く観察された。将来、さらに損傷速度を変化させた実験を行い、これらの照射パラメータへの複雑な依存性を明らかにする必要がある。

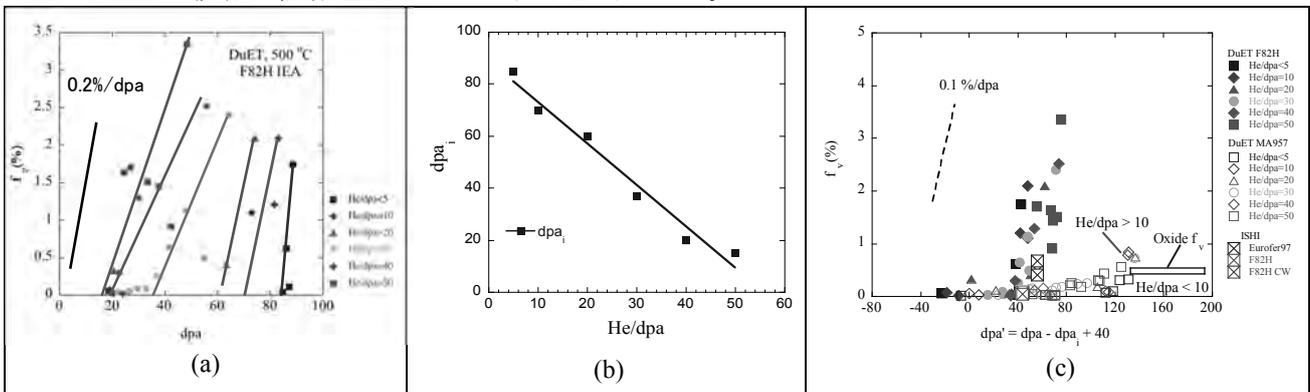


図 2 F82H 鋼 IEA 材における(a)損傷/He 量毎のポイド体積率(f_v)の照射量(dpa)依存性、(b)閾線量 dpa_i の He/損傷比依存性と、(c) 照射量パラメータ dpa' ($=dpa - dpa_i + 40$)による統合 f_v 曲線の MA957 材や中性子照射実験との比較

4. 発表記録

[投稿論文]

T. Yamamoto, Y. Wu, G.R. Odette, K. Yabuuchi, S. Kondo, A. Kimura, “A Dual Ion Irradiation Study of Helium-DPA Interactions on Cavity Evolution in Tempered Martensitic Steels and Nanostructured Ferritic Alloys” J. Nucl. Mater. 449 (2014) 190-199.

バイオリファイナリーのための超高感度 NMR による リグニンの構造解析

渡辺隆司^{1,3}, 西村裕志^{1,3}, 中村嘉利⁴, 岸本崇生⁵, 中村正治^{3,6}, Qu Chen^{1,3},
酒井洋尚², 岡村英保², 片平正人^{2,3}

¹京都大学生存圏研究所, ²京都大学エネルギー理工学研究所, ³JST CREST,
⁴徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス研究部, ⁵富山県立大学・工学部, ⁶京都大学化学研究所

1. 研究概要

樹木に代表される木質バイオマスは、地球上に最も多く蓄積されている有機資源である。これを有効に変換、利用して、化成品をはじめとした有用物質やバイオエネルギーを生産することは、環境調和型の持続可能な社会の実現に貢献すると期待される。植物細胞壁は、主にセルロース、ヘミセルロースおよびリグニンによって構成されていて、互いに多様な結合で三次元の高分子を形成している。木材成分は分子量分布をもった高分子であり、多様な結合構造が存在するため、分析と定量評価が難しい。核磁気共鳴法(NMR)は、木材細胞壁内部の結合構造を分子レベルで包括的に分析することができる強力な分光法であり、我々は NMR 法を中心に木質バイオマスの変換反応過程における構成成分の変化を評価する手法の開発を進めている。

HSQC 法は物質を定量する有力な手法であるが、弱点がある。同法の INEPT 期と reverse INEPT 期において、磁化は横緩和によって減弱する。横緩和速度は分子量が大きいほど早いので、高分子量の物質ほど減弱が激しく、磁化が小さくなってしまふ。この為 HSQC の相関ピークの体積は、高分子量の物質ほど小さくなる。この為様々な分子量を有する物質の混合液に対しては、相関ピークの体積に基づいて物質量を定量した場合、正しい結果が得られない。この問題を解決する為に今回、HSQC 法と TROSY 法を組み合わせた新しい物質定量法を開発した。分子量が大きく異なる二つのバイオマス関連物質の混合液にこの手法を適用した結果、定量が正確にできる事が実証された。

2. 結果と考察

リグニン 2 量体とカードラン(図 1)を DMSO 溶液に当モル溶解した。この溶液の HSQC スペクトルを測定し、リグニン 2 量体に関する相関ピーク 1-4 と、カードランに関する相関ピーク 9-12 の各々の体積を計算した。リグニン 2 量体に関するピークの平均値を 1 に規格化したものを図 2 左に示す。カードランはリグニン 2 量体に比べて分子量はるかに大きい為、横緩和速度が速い。この為 INEPT 期と reverse INEPT 期においてカードランの磁化はより減弱し、その結果相関ピークの体積がかなり小さくなってしまふ(平均値 0.671)。この為 HSQC の相関ピークの体積に基づいて、物質の量比を正確に決定する事はできない。

TROSY 法においては、プロトンの定常状態磁化 H_z とカーボンの定常状態磁化 C_z の両方が、相関ピークに寄与する。同法においてプロトン由来の磁化は、INEPT 期と SP2-PT 期の両方で横緩和によって磁化が減弱するが、一方カーボン由来の磁化は、SP2-PT 期でのみ横緩和によって磁化が減弱する。従ってプロトン由来の TROSY 相関ピークとカーボン由来の TROSY 相関ピークの強度の比較から、

INEPT 期における磁化の減弱量に関する情報を取得する事ができる。この情報に基づいて HSQC の相関ピークの体積を補正した結果を図 2 右に示す。カードランに関する相関ピークの体積が総じて大きくなり、リグニンに関する相関ピークの体積と大きさに遜色がない(平均値 0.989)。従ってこの補正を施した体積を用いれば、分子量(横緩和時間)が大きく異なる物質に関しても、その量比を正確に決定する事ができる。

3. 研究発表成果

[口頭発表リスト]

- 1) Nishimura, H., Watanabe, T., Katahira, M.他, "Real-time NMR monitoring of enzymatic reaction of anti-HIV protein, structure of anti-prion RNA aptamer and wood biomass analysis", The 5th Japan-Taiwan NMR symposium, 2014.9.28-10.3, Sapporo.
- 2) Nishimura, H., Watanabe, T., Katahira, M.他, "Development of new methods to compensate distortion of quantitation caused by difference in molecular weight (transverse relaxation time)", 第 53 回 NMR 討論会, 2014.11.4-6, 大阪.
- 3) Nishimura, H., Nagata, T., Watanabe, T., Katahira, M.他, "Development of new NMR methods for correct quantitation on biomass components", The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, 2014.9.30-10.2, Kyoto.
- 4) Watanabe, T., Nishimura, H., Katahira, M.他, "Structural analyses of lignin using ultra-high sensitivity NMR for biorefinery", The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, 2014.9.30-10.2, Kyoto.

[発表論文リスト]

- 1) 片平正人, "溶液 NMR 法による木質バイオマスの丸ごと解析", 細胞工学, 33, 837-842, 2014.

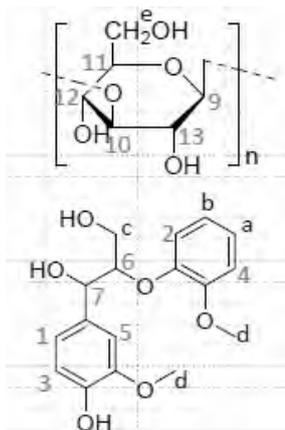


図 1 カードラン(上)とリグニン 2 量体(下)の構造

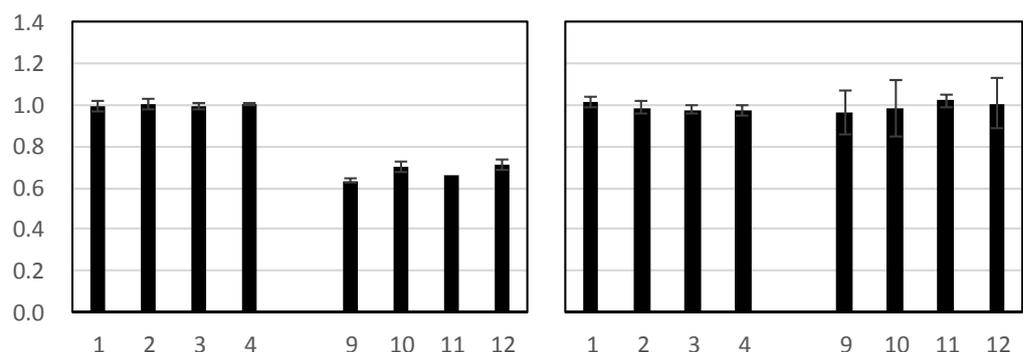


図 2 ^1H - ^{13}C HSQC スペクトルにおける相関ピークの体積(ピーク 1 から 4 の体積の平均値を 1 に規格化)。(左)実測値, (右)TROSY を用いて較正した値。

ヘリカル軸逆磁場ピンチ配位への自己組織化ダイナミクスとその制御によるプラズマ高性能化

政宗貞男¹, 三瓶明希夫¹, 比村治彦¹, 水内 亨², 岡田浩之²

¹京都工芸繊維大学 大学院工芸科学研究科

²京都大学 エネルギー理工学研究所

1. 目的

高ベータ内部電流系トーラスプラズマとしての逆磁場ピンチ (RFP) では、従来の「Taylor 緩和」の枠組みを越えた、軸対称性を有する磁気境界条件の下での「ヘリカル軸 RFP 配位への遷移現象」が観測されている。同時に「電子輸送障壁」の形成も観測されている。この自己組織化過程においては電流駆動型の抵抗性不安定性が重要な役割を果たしていることが実験的に確かめられているが、最近の申請者らのグループと核融合科学研究所シミュレーショングループとの共同研究により、低アスペクト比 RFP 配位の場合、磁気島を伴わない内部非共鳴キンク不安定性の成長を通してヘリカル軸 RFP 配位に自己組織化するルートがあり得ることがわかった。(Masamune et al., IAEA FEC25, 2014) このルートでは、磁気リコネクションを伴わないプラズマの変形だけでヘリカル軸配位に到達できるので、自己組織化の過程におけるエネルギー損失を抑制することができると予想される。これは、自己組織化のダイナミクスがその結果形成されるヘリカル軸 RFP 配位のプラズマ性能に直接影響を与える可能性を示すもので、自己組織化のダイナミクスを実験において詳細に調べ、その過程を能動的に制御する方法を探ることが本研究の目的である。大域的ヘリカル構造への遷移において電流駆動不安定性が主要な役割を果たす内部電流系 (RFP) 高温プラズマにおける自己組織化と、圧力駆動不安定性が本質的な役割を果たす外部電流系 (H-J) 高温プラズマにおける遷移現象 (局所的分布変化を含む) の比較研究を進め、トーラス系高温プラズマにおける遷移現象の理解に対する学術的貢献が可能となる。回転変換と磁気シアの空間分布において互いに相補的な配位である RFP と H-J において、遷移現象としての構造形成における MHD 不安定性の役割の解明、構造形成過程とその性質に関する詳細な比較をエネルギー理工学研究所 H-J グループと共同研究として進めることにより、ヘリカル軸高温プラズマに対する相互の理解を深めることが可能となる。

2. 方法

本共同研究では、内部電流系トーラス高温プラズマとして、京都工芸繊維大学の低アスペクト比 RFP 実験装置 RELAX を用い、外部電流系ヘリカル軸高温プラズマとして H-J を利用する。

低アスペクト比高温 RFP プラズマ装置 RELAX においては、サドルコイルアレイを用いたフィードバック制御系の整備が進み、MHD 不安定性の制御が可能となった。(Tanaka et al., PFR, 2014)。トムソン散乱による中心電子温度測定 (Ueba et al., PFR, 2014)、軟 X 線放射計測も可能となった。超音速ガスパフの初期実験結果も得ている。これらの計測器・制御系を駆使してヘリカル軸 RFP 配位への自己組織化ダイナミクスを詳細に調べ、関与する MHD 不安定性の性質を解明しつつ、その不安定性の能動的制御方法を検討・実施する。

3. 成果

低アスペクト比 RFP のヘリカル状態への自己組織化の例として、図 1 に RELAX における SXR 画像計測と CT 手法の適用により得られた SXR 放射強度分布の等高線と、3 次元 MHD シミュレーションコード (MIPS コード) により得られた等圧力面 (カラーコード) を示す。(Masamune et al., IAEA FEC25, 2014)。SXR 放射強度分布から単一の磁気島構造またはヘリカル軸の形

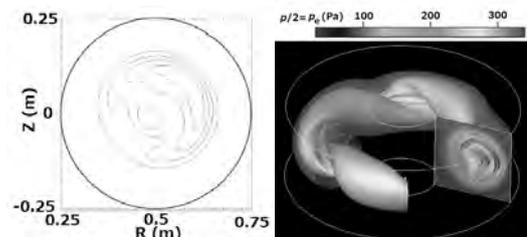


図 1: 左: SXR 画像計測と CT による SXR 放射強度等高線 (磁気面)。右: MIPS シミュレーションの結果。モード間の強い非線形相互作用の後、ヘリカルに変形した等圧力面。

成が示唆されており、シミュレーションではヘリカル軸の形成が示されている。

軸対称 RFP 配位におけるプラズマ放電性能の改善を図 2 に示す。64 個のサドルコイルアレイを利用した単一 RWM の安定化により、RFP 放電の性能（放電時間）は装置による制限（ポロイダル磁束）で決まる領域に到達した。さらに性能改善を行うためには電流立ち上げフェーズでの集束電圧低減化が必要であり、そのためにマルチモード制御を目指したフィードバック制御系の改良を進める予定である。

プラズマパラメータ、特に電子ベータ値の電子密度依存性を図 3 に示す。現在電子密度は Greenwald 限界の 30% 程度である。高速（超音速）ガスパフにより、さらに高密度領域への到達を目指している。電子ベータ値（中心電子圧力をプラズマ端ポロイダル磁場圧力で規格化、RFP 配位ではトロイダル磁場が弱いのでほぼ全ベータ値に等しい）は最大 15% に達している。電子温度は 100–200eV の領域であり、低アスペクト比 RFP の特長であるブートストラップ電流の研究が可能となる領域に極めて近い領域に到達している。

低アスペクト比 RFP プラズマの性能改善のために単一 RWM のフィードバック制御を行った。これに加えて、弱い水平磁場を用いた平衡制御（不整磁場の水平成分）がベータ値の向上に必要である。この制御がベータ値の向上に効果的であることは、オーミック電流駆動用 1 次巻き線に関係すると考えている。真空容器と同軸状に設置された 16 組 32 本の 1 次巻線の電流の大きさは巻き線の抵抗値、インダクタンス値などの違いにより完全には一致しない。そのため、一般には多重極成分を発生し、これが不整磁場となって局所的な平衡に影響を与えるものと考えている。

低アスペクト比 RFP プラズマの高性能化により新しいパラメータ領域での RFP 物理研究が可能となってきた。この領域では従来よりも深い反転（したがって高いピンチパラメータ）の領域でもヘリカル状態への遷移（自己組織化）を示唆する磁気計測データが得られつつある。詳細な分布測定、高時間分解 SXR 画像計測（から CT 解析）を併用することによって、新しい放電領域でのヘリカル RFP 配位への自己組織化ダイナミクスの解明と、可能であれば、外部磁場により制御された自己組織化の実現とプラズマ性能との関連解明へと研究を展開したい。

4. 成果発表

[口頭発表]

1. S. Masamune et al., 25th IAEA Fusion Energy Conf., EX3-P52, St. Petersburg, Oct. 12-17, 2014.
2. 石井豪、政宗貞男、水内亨他、「高速ガス入射による低アスペクト比 RFP プラズマの高密度化」、Plasma Conference 2014, 19PA-036、朱鷺メッセ、2014 年 11 月 18 日–21 日。

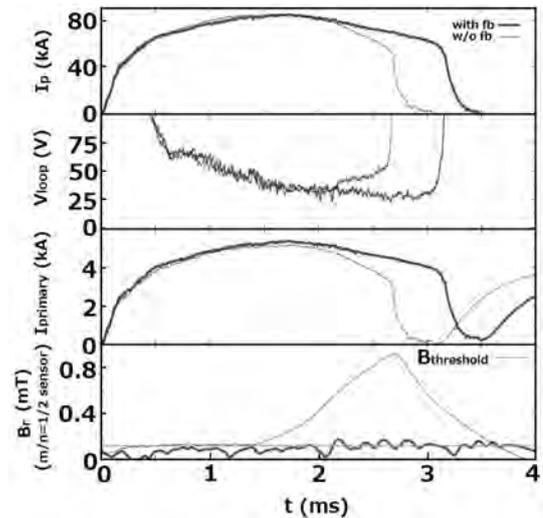


図 2: 単一 RWM ($m=1/n=2$) の安定化によるプラズマ放電特性の改善 (赤)。

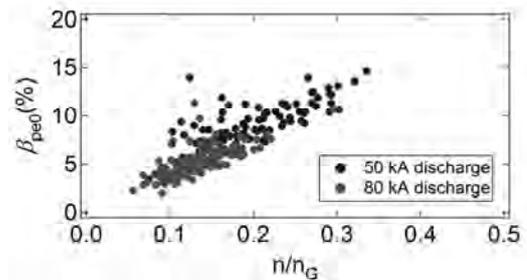


図 3: 中心電子ベータ値のプラズマ密度依存性。

放電型核融合中性子源における D-T 放電特性の研究

大澤穂高¹, 山本 靖¹, 大西正視¹, 増田 開², 波多野雄次³, 村田 勲⁴

¹ 関西大学システム理工学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

³ 富山大学水素同位体科学研究センター

⁴ 大阪大学大学院工学研究科

1. 序

放電型核融合中性子源 (IEC 装置) において、現在重水素で 10^7 個/sec の D-D 核融合中性子の生成に成功している。D-T 反応を用いれば約 200 倍の反応断面積を考慮すると、最大 10^{10} 個/sec の中性子生成が可能であり、中性子源の応用が格段に広がると考えられる。医療分野では BNCT による癌治療、工学分野では中性子ラジオグラフィ、また核融合炉研究開発では校正用 D-T 中性子源、模擬ブランケットにおける TBR 基礎研究等が挙げられる。トリチウムを用いるためには安全性を考えて、密閉型の装置の開発が不可欠であるが、従来の放電型中性子生成装置はすべて開放型である。本共同研究では D-T 燃焼放電型中性子源を実現すべく、重水素およびトリチウムガスの注入・分圧制御・排気を密封系で行なえるシステムを製作し、 T_2 ガス混合した重水素ガスを用いることにより D-D 反応以上の中性子生成を実証することが目的である。

2. 研究成果

2.1 密封系放電型核融合中性子源

京大エネ理工研の水冷式放電型中性子源装置の設計を元に、関西大学において真空容器を購入し、サエスゲッター社のストラップ状の St.707 ゲッター材を用いて、小型のゲッターポンプを作成してトリチウムガス注入/排気系を設計・製作した。この装置において吸気/排気実験を行ったところ 99% 以上のトリチウムをゲッター材に回収できることを確認した。また、トリチウムの使用が可能で、D-T 反応に伴う 14MeV に対応した放射線遮蔽を持つ既設の実験室である大阪大学の未臨界実験棟 (重照射実験室: オクタビアン核融合中性子源用) を共同研究として使用した。作成した密閉系放電型核融合中性子源を未臨界実験棟に移設し、重水素を用いた調整実験を行った。その後、富山大学水素同位体科学研究センターの協力を得て重水素(93%)、トリチウム(7%)の混合ガスの供給を受け D-T 燃焼実験を行った。

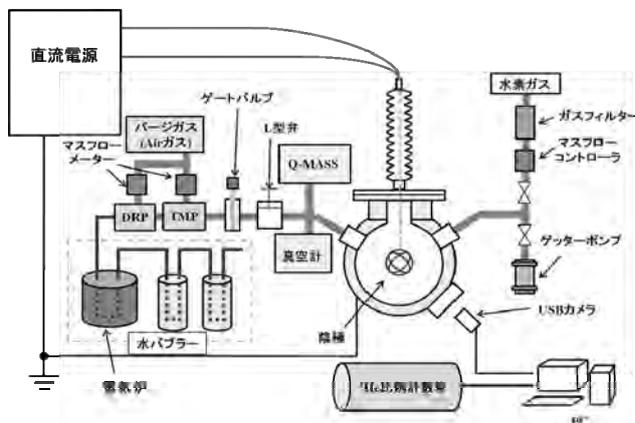


図1 密封系放電型核融合中性子源



図2 密封系放電型核融合中性子源の外観

2.2 密封系放電型核融合中性子源の放電特性

重水素ガス単体及びトリチウム混合重水素ガスの 10mA 放電実験の結果を図 3 に示す。重水素ガス単体の場合は重水素ガスポンプ、ターボ分子ポンプおよびドライポンプを用いて十分な量のガス供給と排気を行ったため非常に安定した放電を行うことが出来た (図 3 中の D-D 放電特性)。一方トリチウム混合ガスは密封系として動作させるためにゲッターポンプのみにて吸気/排気を行っているので時間の経過とともにガス圧が安定しなくなる結果となった。図 3 の D-T 放電特性と表記しているのが結果であるがこれは供給開始直後の最も安定していた結果である。この 2 つを比較するとほぼ同じ放電特性を持っていることがわかる。混合ガスは 6Pa 程度ゲッターに吸気して使用していたが実験開始と共に中性子源の内壁などに吸着し、初回の実験以降は 2Pa 以上に保つことが出来なかった。

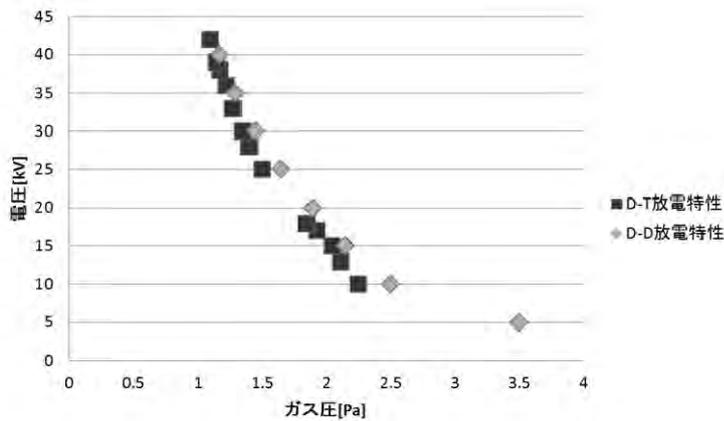


図 3 D-T ガス放電特性(10mA)

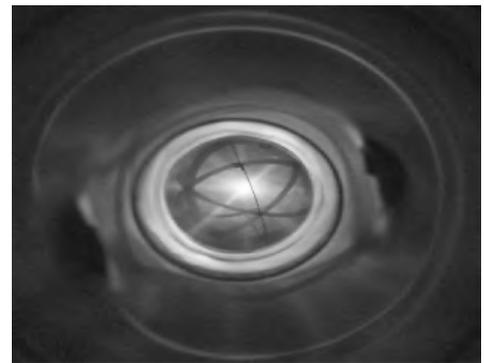


図 4 放電の様子 (10mA,36kV,1.3Pa)

2.3 密封系放電型核融合中性子源の中性子生成

中性子測定は中性子源直下に配置した ^3He カウンタを用いて行い、AmBe にて較正を行った。図 5 に放電電圧に対する中性子生成率を示す。D-T 燃焼時には上記の通り放電が安定せず左右のバーは放電開始および放電終了時を示している。今後の細かい検証および解析が必要であるが重水素単体の D-D 放電の時よりも平均 3~5 倍の中性子生成を確認できた。また概算ではあるが 1%程度の混合比のトリチウム-重水素ガスが D-T 燃焼した場合の中性子生成だと考えられる。密封系におけるトリチウムガスの供給/排気および真空容器内部での挙動についての経験が不足しておりしっかりと検討し再実験を行う必要がある。

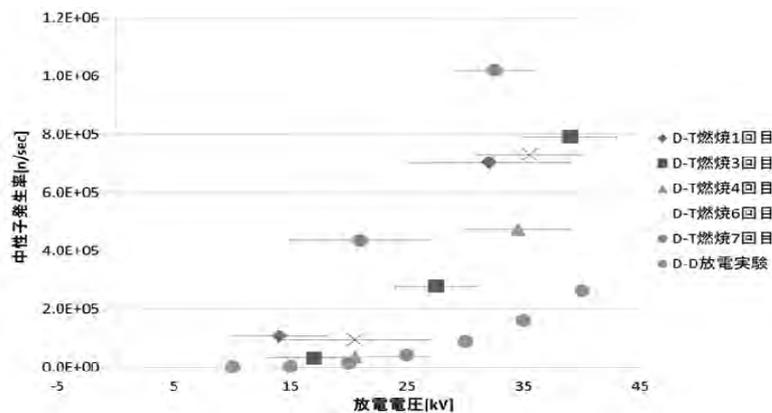


図 5 密封系放電型核融合中性子源の中性子生成(10mA)

イオンビームを用いた高粒子・高熱負荷実験設備の整備と核融合炉ダイバータ材の試験

山本 靖¹, 興野文人², 米津大吾¹, 登尾一幸³, 笠田竜太², 小西哲之²

¹ 関西大学システム理工学部

² 京都大学エネルギー理工学研究所

³ 富山大学水素同位体科学研究センター

1. 緒言

核融合装置では極めて過酷な形で流れるエネルギーを理解、制御し利用することが必要とされる。高熱粒子負荷に耐え、熱利用を可能とするダイバータはその典型的な部分である。実験的研究における高熱負荷源としては電子ビーム照射装置が広く用いられているが、粒子負荷という面ではイオンビームを用いることが必要である。高熱負荷・高粒子負荷実験に使用可能な規模のイオンビーム発生装置は国内にも幾つかあるが、そのほとんどはプラズマ実験装置の一部であり、本拠点の南3号棟にある直接発電実験装置のイオンビーム装置（水素ビーム 30kV, 6A）はテストスタンドとして利用可能な数少ないものである。本共同研究では、水素イオンビームによる模擬条件を構成し、損耗と 10MW/m² 領域でのエネルギー移行現象のメカニズムの解明を目標とする。また、受熱機器としては、W被覆 SiC 複合材ダイバータを検討し、液体金属冷却を用いることで、500°C 以上での利用可能な形に目標とする。

2. 研究成果

・イオンビームの引き出し

昨年度より開始したアーク放電、イオンビームの引き出し実験では、電極間のブレークダウンと、それに伴うサージによる電源の故障が発生した。イオン源のエイジング過程ではブレークダウンが避けられないことから、サージブロックの追加、インターロックの整備などを行っているが、当面の対策としては、一部を更新前の電源に戻したりして、対応している。

図1に PIG 放電におけるピエゾバルブ電圧とピラニ真空計からの圧力信号、アーク電圧・電流波形を示す。放電時間は約 300msec, 110V-37A の放電である。このときは、ピラニ真空計に圧力波形に合わせて、アーク放電のタイミングを定めていた。しかし、その後の実験より、ピエゾバルブへの印加圧を止めるとアーク放電電流がガス不足で減少し始めるまでの遅延時間が約 20msec であることから、圧力信号が大幅にずれていることが想定されている。これは、デジタルピラニ真空計に A/D 変換は、200ms 毎であり、出力信号はデジタル値を値間の補間を含む D/A 変換であることから、A/D 変換時間の数倍の時間遅れがあるためと推定している。現在は、この遅れを考慮しながら、ガス圧の低いところでの放電を探索している。

図2に 12 月末の 15kV ビーム実験での加速電源・減速電源電流波形、アーク電源の電圧・電流波形を示す。

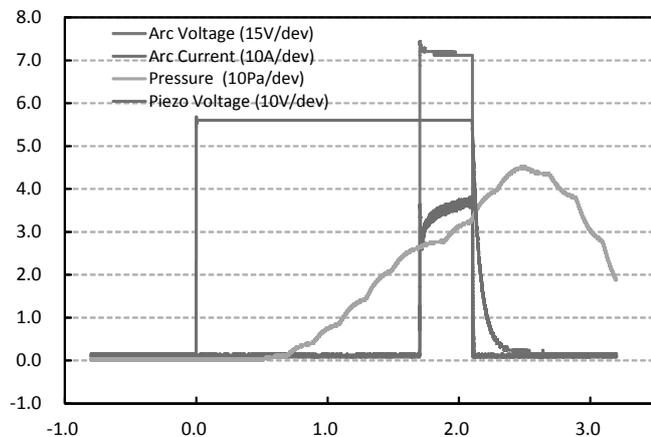


図1 アーク放電電圧・電流，ガス圧波形

昨年に比較すると、PIG 放電を繰り返し、徐々に放電電圧を増加させたことで、これまでの最大引き出し電圧は 17kV であり、15kV では、安定したビーム引き出しができるようになった。

過去の運転記録を元に、PIG 放電パラメータの調整を試みている。

- piezo 印加電圧を減少。 56V → 47.5V

PIG 放電はガスが多い方が安定するが、加速電流はガスを絞る方が増加する傾向にあり、生成したイオンがガスとの衝突により失われていると考えられることから、ガスパルスのタイミングを調整しながら、最適点を検索。

- アーク設定電圧の減少 150V → 130V

パルスの始めに、加速電流が大きく流れるのを抑制することを目的に、初期設定を下げていくと、アーク放電電流としては、時間と共に増加する傾向であるが、加速電流としては、ほぼフラットな特性を得ることができた。

- 磁場電流の増加 35A → 42A

PIG 放電のみのときは、アーク電流を増やす目的で電流を少なめで運転してきたが、アーク放電を集中し、チャンバー内にプラズマを押し出すこと、また、このイオン源ではプラズマ閉じ込め用のカスプ磁場がついていないことから、強めの方が閉じ込め効率が良いと考えられることから、増加させていくと、アーク電流は減少するが、加速電流は増加する傾向にあり、最適点を検索。

電源などの更新があるため、過去（15kV-1A を目標）と同じではないが、調整を行った結果、引き出し電流を 300mA 程度から、650mA 程度まで増加させることができた。 今後は、可動型のカロリメータ、マイクロファラディメータを用いて、引き出しプロファイルを確認しながら、更に調整を進めるとともに、一度イオン源を分解して、内部の状況を確認してみる必要がある。

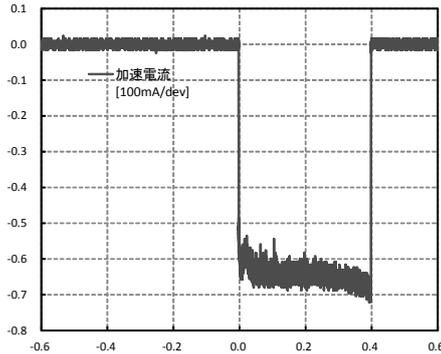
- 試験部の検討

試験部としては、当面の実験としては、ビーム直接発電実験装置同様に、試験片ホルダーを上部フランジより吊り下げて行うことを検討している。

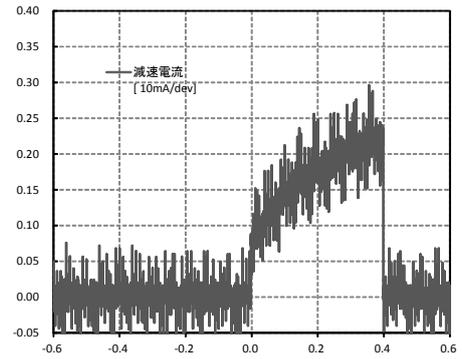
3. 今後の予定

安定稼働に向けてサージ対策、イオンビームプロファイル測定と運転パラメータの最適化などを進める計画である。また、実験の進展により、制御系の問題点なども明らかになってきていることから、その改善も進めると共に、試験部/実験測定系の整備に着手する。

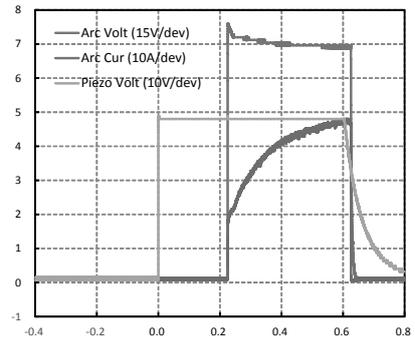
今回の更新・近代化は、電源系を中心としたため、イオン源ソースプラズマ部の更新、効率改善などは未着手であり、今後はこれらの課題にも取り組んでいきたい。



加速電流波形



減速電流波形



アーク電流電圧波形

図 2

リチウム鉛合金中におけるリチウム酸化物の 化学的挙動に関する研究

近藤正聡^{1,2}, 中嶋 結², 鈴木成実², 辻 光世¹, 笠田竜太³, 小西哲之³

¹東海大学工学部原子力工学科

²東海大学大学院応用理学専攻

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景・目的

ゼロエミッションを達成可能な商業用核融合炉開発への重要なステップとして、液体燃料増殖材を使用した原型炉設計が進められている。鉛リチウム合金は、鉛(Pb)の中性子増倍作用とリチウム (Li) のトリチウム増殖作用を兼ね備えた優秀な液体燃料増殖材であるが、その性能のメンテナンス性に関しては未解決の課題がある。その一つは、長期間高温条件下で使用する鉛リチウム合金の品質管理である。京都大学が推し進めるバイオマスハイブリッドシステムのようなデザインの場合、700°C以上の高温で使用される可能性もある。高温状況下における鉛リチウム合金の酸化等による純度の低下はある程度許容しなければならない。過去の研究結果から、鉛リチウム合金が酸化する事により、Li が選択的に酸化して失われる可能性が示唆された。しかし、Li 濃度に関しては、ブランケットにおけるエネルギー増倍と燃料増殖に大きく影響するため、運転期間中は常に一定に保ち続ける必要がある。鉛リチウム合金の酸化特性や、Li 酸化物の化学的挙動は明らかにされていない。Li 濃度を長期間一定に保つためには、酸化を極力抑制するか、生成された Li 酸化物を還元するか、酸化物を除去した上で合金中の Li 濃度を再調整する必要がある。このためには、鉛リチウム中の Li と Li 酸化物の化学挙動を明らかにする必要がある。本共同研究の目的は、鉛リチウム合金中における Li と Li 酸化物の挙動を明らかにする事である。平成 26 年度は、鉛リチウム合金の酸化挙動と酸化による液体ブランケットの性能への影響について調べた。

2. 研究成果

約 12% のリチウム濃度の鉛リチウム合金(Pb-12Li)100 cc を用いて、大気暴露型高温酸化試験を実施した。大気中において、375°C の温度条件で 311 時間保持した。試験中、合金の自由表面には、オレンジ色の酸化物が形成された。この酸化物を回収し XRD 分析を実施したところ、図 1 に示す結果が得られた。測定結果から、 Li_2PbO_3 が形成されている事がわかった。鉛リチウム合金が大気中で酸化した場合、低いリチウム濃度における低い活量にも関わらず、酸化反応に鉛 1mol が反応するのに対してリチウム 2mol が酸素と反応する事がわかる。酸化物を形成したリチウムは合金内の組成として機能しなくなるため、酸化反応によりリチウムが選択的に失われる事が示唆している。同時に PbO の形成も検出されているが、これはある程度合金が酸化してリチウムが失われ、合金の組成が純鉛に近い状態になった後で形成されたものであると考えられる。また、酸化試験前後の合金の冷却曲線を、合金中に浸漬した熱電対により測定した(図 2)。酸化試験前の冷却曲線には、合金状態図が示す Pb-12Li の融点付近の温度で温度変更点が観察された。試験後の合金では、温度変更点は観察されず純鉛の融点(600.6K)に近い温度でプラトーを示した。これらの結果から、鉛リチウム合金の酸化がリチウム濃度の低下につながる事が明らかになった。

次に、高速点火レーザー核融合発電プラント KOYO-Fast のブランケット体系をモデルとして、リチウム濃度と TBR の関係を重イオン輸送統合コードシステム PHITS 用いて調べた(図 3)。15mol% 付近の条件から Li 濃度が低下した場合、TBR は線形的に減少する事がわかった。

3. 結論

鉛リチウム合金の酸化特性を、大気暴露型高温酸化試験により明らかにした。酸化反応においてリチウムが選択的に失われる事が分かった。酸化によるリチウム濃度の低下はブランケットの燃料増殖性能の低下に直結する事を、レーザー核融合炉の体系における数値計算により定量的に明らかにした。

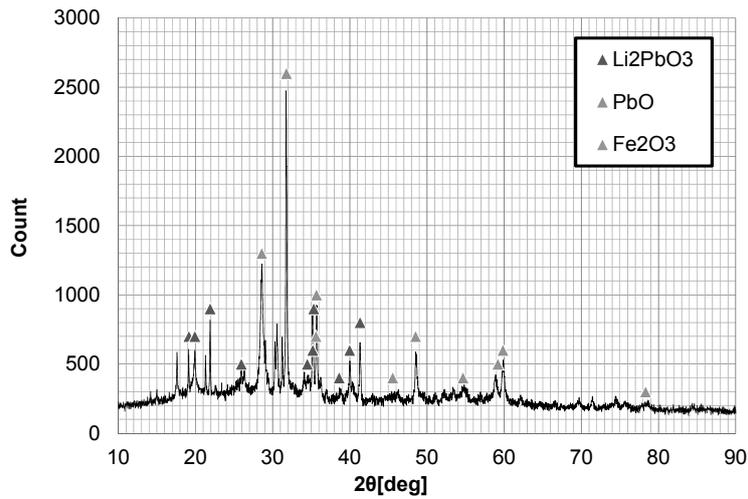


図1 鉛リチウム自由表面に形成された酸化物の XRD 分析結果

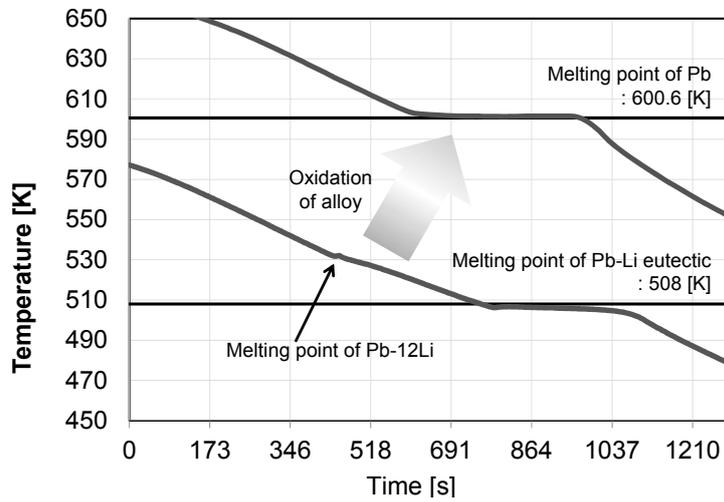


図2 大気暴露型酸化試験前後の合金の冷却曲線

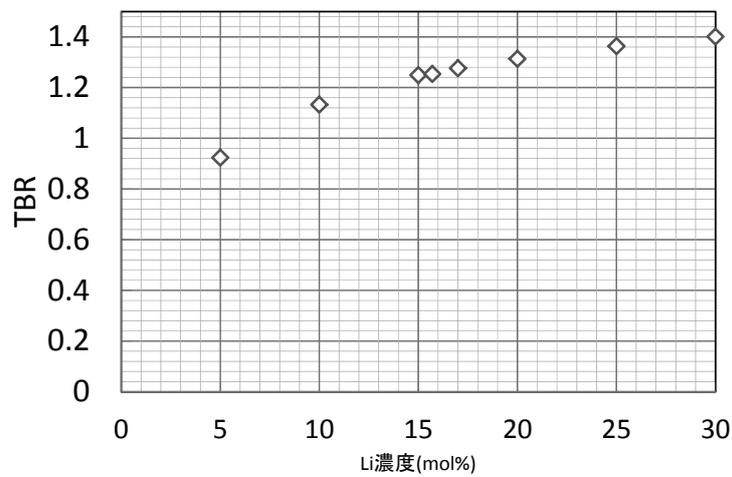


図3 Li 濃度と TBR の関係

レーザーフォトカソード RF 電子銃を用いた KU-FEL エネルギーの増強と利用

黒田隆之助¹, 平 義隆¹, 全 炳俊², 紀井俊輝², 大垣英明²

¹産業技術研究所計測フロンティア研究部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

本研究は京都大学エネルギー理工学研究所の KU-FEL 施設において、マルチバンチ電子ビームによる革新的な FEL エネルギー増強を行うため、光陰極電子銃用の独自のマルチパルスレーザー開発研究を行うものである。その際、目標とするレーザーに要求される項目は①モードロック周波数と加速周波数 (2856 MHz) の同期、マルチパルスレーザー発振器と FEL 共振器長 (約 5 m) の同期、③マクロパルス当たり数 100 以上のマイクロパルスを形成出来る事、④マクロパルスの強度及びマイクロパルスの強度が FEL 発振に対して安定で有る事、⑤シングルパルス動作が可能な事、などの項目があげられる。目標値としては、マクロパルス内のマイクロパルス数 300 以上、マクロパルスの繰り返し 1~10 Hz、マクロパルスフラットネス、及びマイクロパルスの強度揺らぎは 1%以下、マイクロパルス当たりのエネルギーは UV に波長変換後で 10 μ J 以上を目指したシステム設計・製作を行う。同時に、開発した UV レーザーを KU-FEL 電子銃の高周波空洞カソード面に照射し、光電効果により光電子を発生させ、KU-FEL のエネルギー増強に最適なマルチバンチ電子ビーム生成の実現を目指す。

2. 研究開発手法

本研究において開発するレーザーシステムでは、レーザー発振器として Time-Bandwidth 社製 Nd:YVO₄ モードロックレーザー(GE-100-VAN)を用い、発振波長 1064 nm、繰り返し周波数は KU-FEL の加速周波数と同期可能な 89.25 MHz (32 分周波、時間間隔 11.2 ns)、平均出力 600 mW、パルス幅 7.5 ps(FWHM)である。加速器との同期では、モードロックレーザーの共振器長をピコモーター及び PZT 素子を用いて制御し、基準信号との Phase-Lock-Loop(PLL)によって高精度同期を行う設計である。モードロックレーザー発振器のパルス列は、AOM(Acousto-Optic Modulator)変調器により任意の強度変調を持ったマクロパルス列に切り出す事ができ、発振器直後にはビームアラインメントシステムを導入する事で、位置、角度共にフィードバック制御により安定化する事で、システムの安定化を図っている。後段には 2 段の LD(Laser Diode)励起 2 パスアンプを構築した。アンプには CEO 社製 REA5006-2P1 モジュールを使用し、 ϕ 5 mm \times 12.6 cm の Nd:YAG 結晶によりレーザー増幅を行っている (図 1)。増幅した基本波レーザーを波長変換結晶により UV レーザーパルス列に変換し、KU-FEL の加速器室まで輸送し、最終的に KU-FEL 電子銃空洞のカソード面に照射する事で電子ビーム生成を行う。

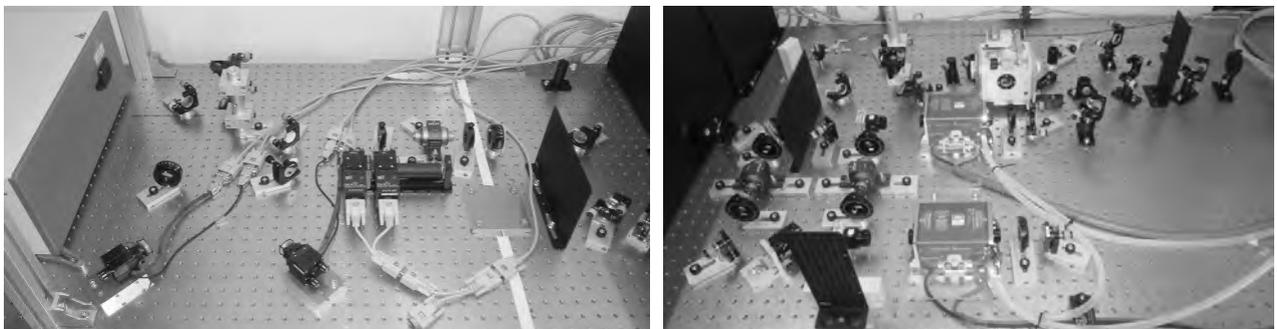


図 1: 構築したレーザー装置の写真。左: 発振器とビームアラインメントシステム。右: 2 段の 2 パスアンプと波長変換結晶。

3. 研究結果

本年度は、赤外から UV へ変換する波長変換結晶において変換効率を調査すると共に、UV パルス列の矩形マクロパルスへの整形を行った。

赤外から UV への波長変換には、まず 2 次高調波発生用結晶として KTP 結晶を、4 次高調波発生用結晶として KDP 結晶を用いた。図 2(a)にシングルパルス生成時、実験的に得られた 2 次高調波発生における入射基本波エネルギーと 2 次高調波エネルギーおよび変換効率の関係性を、図 2(b)に 4 次高調波発生における入射 2 次高調波エネルギーと 4 次高調波エネルギーおよび変換効率の関係性を示す。図より変換効率が入射光強度に強く依存する事、それぞれの結晶において 30% 以上の変換効率を得る為には、入射する基本波のエネルギーが 600 μJ 以上必要である事が分かる。また、シングルパルス発生時に得られる最大の UV パルス強度が 205 μJ で有る事が見て取れる。

次に発振器に内蔵の AOM 変調器を用いて矩形 UV パルス生成を試みた。図 3(a)に適切な変調信号を与えた場合の UV パルス出力波形を、図 3(b)に矩形パルスを変調信号として与えた場合の UV パルス出力波形を示す。図 3(a)では AOM 変調器から取り出すレーザーパルスをマクロパルス後段になればなるほど増加させてやり、2 段 2 パスアンプでのゲイン低下を補償してやる事で、矩形 UV パルスの発生に成功しているのに対し、図 3(b)では 2 段 2 パスアンプでのゲイン低下が激しく、1 μs の間にレーザーパルス強度が急激に減衰しているのが分かる。本実験の結果、マイクロパルス当たり 3.9 μJ のパルスエネルギーを持ち、マイクロパルス数が約 450 の UV マルチパルスレーザーの発生に成功した。

4. まとめ

本研究では、KU-FEL のエネルギー増強を目指したマルチバンチ電子ビーム生成の為のマルチパルスレーザーの開発を行った。本年度は赤外から UV への波長変換結晶の変換効率とその入射レーザー強度への依存性を調査した。

また、AOM 変調器に適切な変調信号を与える事で、矩形マクロパルスを持つ UV マルチパルスレーザーの発生を行った。結果としてマイクロパルス当たり 3.9 μJ のパルスエネルギーを持ち、マイクロパルス数が約 450 の UV マルチパルスレーザーの発生に成功した。この結果はマイクロパルス当たりのパルスエネルギーが当初目標に対して半分程度の値となっているが、高調波発生用結晶上での基本波レーザーのビームサイズを小さくすることで変換効率を上げ、当初目標を達成可能だと考えている。

最後に、本年度は加速器・レーザー共に度重なるトラブルに見舞われ電子発生実験を行う時間を確保する事が出来なかった。来年度は本年度の結果を踏まえ、レーザー装置を改良すると共に、実際に電子ビーム発生・自由電子レーザー発生を行う予定である。

[論文発表リスト]

H. Zen, S. Suphakul, T. Kii, H. Ohgaki, R. Kuroda, Y. Taira, "Development of Photocathode Drive Laser System for RF Guns in KU-FEL," Proceedings of FEL2014, in Press.

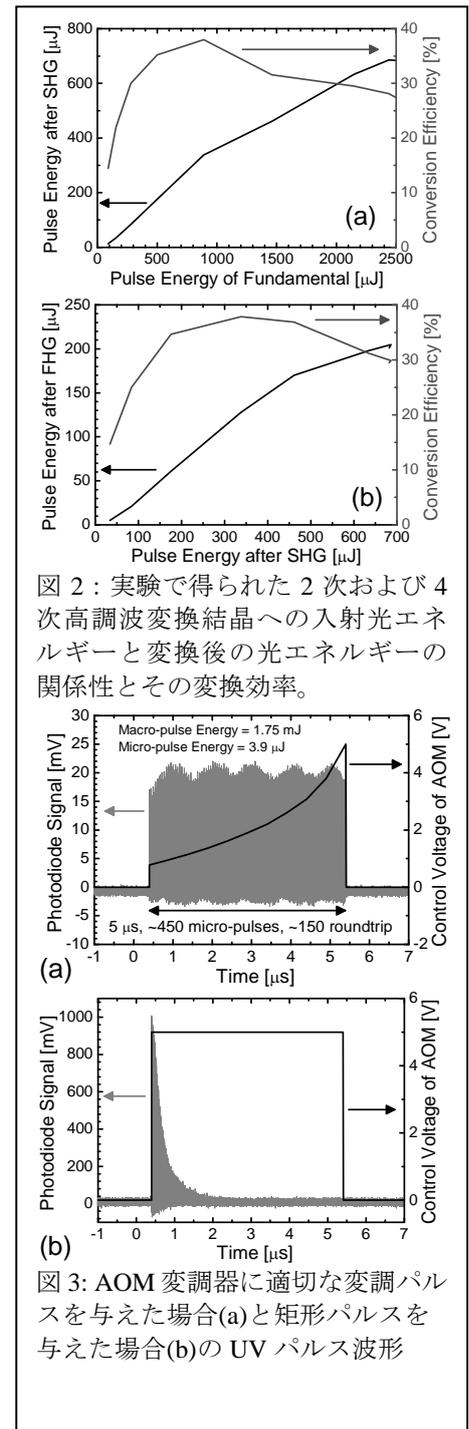


図 2: 実験で得られた 2 次および 4 次高調波変換結晶への入射光エネルギーと変換後の光エネルギーの関係性とその変換効率。

図 3: AOM 変調器に適切な変調パルスを与えた場合(a)と矩形パルスを与えた場合(b)の UV パルス波形

繰り返し高熱負荷環境およびパルス高熱負荷環境下における タングステンの損傷形成機構に関する研究

江里幸一郎¹, 鈴木哲¹, 関洋二¹, 奥西成良², 木村晃彦²

¹日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

核融合システムは二酸化炭素を排出しない（ゼロエミッション）エネルギーシステムである。核融合システムにおける重要な材料科学的課題の一つに、ダイバータシステム材料の開発があげられる。タングステン(W)は他材料と比較して損耗が少なく高温特性に優れていることから、核融合炉内ダイバータといったプラズマ対向機器の表面保護材（アーマ材）として有望な候補材料である。アーマ材表面は $10\text{MW}/\text{m}^2$ 程度の繰り返し定常高熱負荷に加え、ディスラプションや ELM 時等にはパルス高熱負荷を受け、これによる材料表面の材料の劣化・損傷は機器の寿命やプラズマ放電に大きな影響を与えることが予想されている。本研究では、原子力機構で実施した高熱負荷試験（繰り返し加熱およびパルス）後のタングステン表面の破壊挙動および強度特性を明らかにし、材料開発ならびにタングステンを用いたダイバータの設計指針を得ることを目的とする。三年目である今年度は W ダイバータ試験体の断面観察結果と強度特性評価結果を報告する。

2. W ダイバータ試験体への繰り返し高熱負荷試験

2.1. 繰り返し高熱負荷試験の状況

図1にタングステン(W)ダイバータ試験体の概要を示す。試験体には純 W モノブロック (圧延材、27.8mm 幅、26.5mm 高、12mm 奥行) 5枚が銅合金 CuCrZr 冷却管に冶金接合されているものである。W モノブロックと CuCrZr 冷却管の間には、無酸素銅の緩衝層が挿入されている。W と無酸素銅は日本タングステンによる NDB 法により接合されている。無酸素銅と CuCrZr 冷却管は中性子により蒸気圧の高い元素に核変換される金・銀などを含まない、Cu-Mn-Ni 合金によるロウ付けにより、W タイルの圧延方向を加熱面（プラズマ対向面）と垂直になるよう冶金的に接合している。冷却管には無酸素銅製のねじりテープを挿入し、熱伝達（除熱）性能を高めている。本試験体の繰り返し高熱負荷試験は原子力機構の電子ビーム照射試験装置 JEBIS を使用し、冷却管に純水（流動条件：室温、2MPa、10m/s）を供給し、強制冷却を行った。熱負荷条件は $20\text{MW}/\text{m}^2$ 以上の熱流束で 10 秒加熱、10 秒冷却の繰り返しを 1000 サイクル実施した結果、W タイル接合部の除熱性能の劣化は観察されなかったものの、W タイル表面は再結晶を起こし、最も高い熱負荷を受けた中心のタイルでは、熱負荷端部領域で表面変質（粗面化）していた（昨年まで報告）。今年度は、図2に示すように、熱負荷面から銅管ま

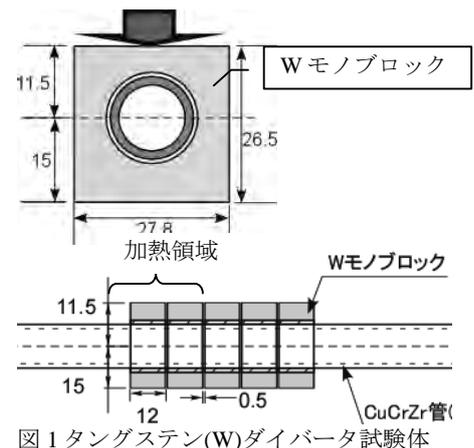
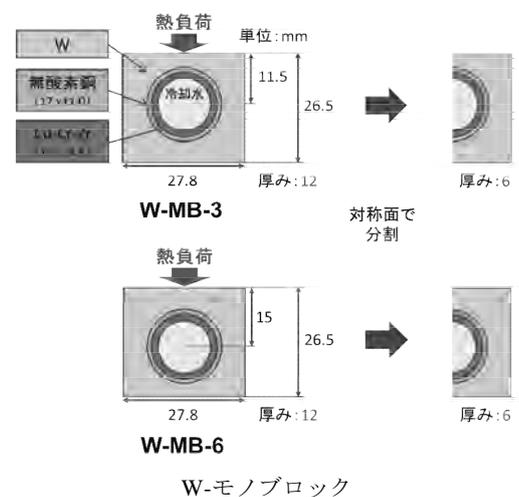


図1 タングステン(W)ダイバータ試験体

図2：2種類の



での距離の異なる二種類の W-モノブロックに対して熱負荷試験を実施し、損傷を比較した。

2.2. 強度特性評価

W-MB-3 と W-MB-6 のビッカース硬さ試験結果を見ると、W-MB-3、W-MB-6 ともに加熱面に近く、高温にさらされるところほど、軟化していることがわかった。二つのモノブロックで測定した結晶粒径とビッカース硬さから、ホール・ペッチの関係を求めると、図 3 に示すように、直線で近似でき、ホール・ペッチの関係に従うことがわかった。

$$HV [GPa] = 3.60 [GPa] + \frac{1.44 [MPa \cdot m^{1/2}]}{\sqrt{d} [\mu m]}$$

一方、再結晶化により、内在していた転位が回復し、転位密度が低下することも硬度低下の原因になることから、再結晶化による転位密度の変化を考慮する必要がある。

4 点曲げ試験を行ったの結果、W-MB-3 では非再結晶部に比べ再結晶部は曲げ強度が低下していることがわかった。さらに、再結晶部の中でもモノブロック端部から試験片を切り出した加熱時に高温になる部分ほど強度が低下している。W-MB-6 では、熔融部および再結晶部で強度が低下しているのは W-MB-3 と同様だが、データのばらつきが大きく温度と強度の関係性は見られない。曲げ試験の結果、すべての試験片が延性を示さず破壊した。

2.3. 断面観察結果

熱負荷試験後の W タイル断面観察を行った。観察は 0.25 μm の砥粒でバフ研磨した後、腐食液を用いてエッチングを行ったものを走査型電子顕微鏡(SEM)で観察した。また、組織変化が硬さに与える影響を調べるため、マイクロビッカース硬さ試験機を用いて硬さを測定した。W-MB-3 に発生した亀裂の観察結果を図 4 に示す。亀裂は粒界に沿って入っており、端部での亀裂深さは 3.4 mm で、W 内で亀裂の進展は止まっており CuCrZr 冷却管および無酸素銅緩衝層にまでは達していない。

亀裂がどこに発生するかについては、再結晶による材料の粒界強度の低下の程度と加熱後の冷却時にかかる引張応力の大きさの兼ね合いにより決定すると考えられ、このモノブロックにおいては中心から 4.5 mm ずれた位置で発生している。

これに対し、熱負荷表面から冷却管緩衝材までの距離が 2 倍の W-MB-6 の場合は、結晶粒径はおおよそ 3 段階に変化していた。さらに、熔融部の結晶粒径は数百 μm と再結晶前の数 μm に比べ、二桁も粗大化していることがわかる。冷却管付近の粒径は W-MB-3 とほとんど変わらなかった。

3. 結言

W ダイバータ試験体にたして、高熱負荷繰り返し加熱試験を実施し、W タイル内の熱・応力分布を評価するとともに、加熱試験後の W タイル内の粒径などを測定した結果、熱負荷を受けた W モノブロックにおいては、高温化に伴う再結晶が硬度ならびに破断強度の低下をもたらし、熱応力によりき裂が発生し易くなることを明らかにした。

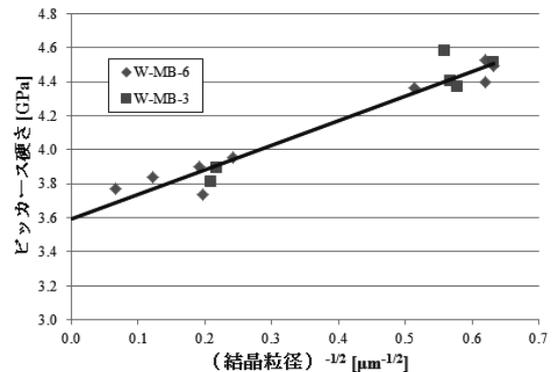


図 3：ビッカース硬さの結晶粒径依存性

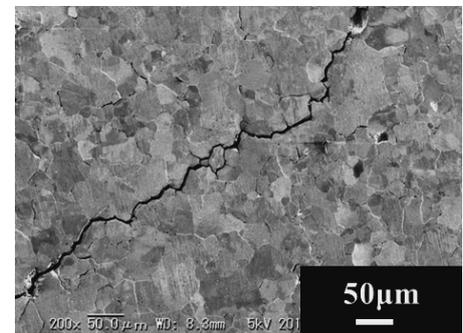


図 4：W-MB-3 に発生した粒界に沿ったき裂

核融合原型炉用酸化物分散強化型低放射化フェライト鋼の キャラクタリゼーション

酒瀬川英雄¹, 谷川博康¹, 安堂正己¹, 木村晃彦²

¹ 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

次世代エネルギープラントにおいてエネルギー変換効率を高めるために高温強度に優れた材料を開発することは非常に有効であり、高速増殖炉や核融合炉においては従来の耐熱鋼をベースとしてその母相にナノメートルサイズの酸化物粒子を分散させることによって高温強度の向上を目指した酸化物分散強化型 (ODS: Oxide Dispersion Strengthened) 鋼の開発が世界各国で鋭意進められている。

日本原子力研究開発機構にて開発された核融合炉用構造材料低放射化フェライト鋼 (F82H) をベースとした ODS-F82H 鋼は他の同系統 ODS 鋼と比較してもトップレベルのクリープ強度特性 (最も要求される高温強度特性) を有することがわかりつつあり、本研究はこの ODS-F82H 鋼の実用化、つまり、大量製造時におけるこの優れたクリープ強度特性の再現性の向上を最終目標として ODS-F82H 鋼の詳細なキャラクタリゼーションを実施、そのクリープ強度特性の支配因子の調査を目的とした。

2. 実験方法

表 1 に ODS-F82H 鋼 (呼称: J1 ヒート鋼) の化学組成を示した。今回のキャラクタリゼーションはメカニカルアロイング粉末状態について特に注目した。これはこれまでの ODS 鋼 (他鋼種を含めて) のキャラクタリゼーションの実施例がメカニカルアロイング粉末を熱間固化までしてバルク状としたものにほぼ限られており、熱間固化前の粉末状態に注目した例が極めて限られているためである。

また熱間固化時の粉末の変形・結合状況に注目するため、放電プラズマ焼結 (加圧力: 20MPa、温度: 950°C、保持時間: 30 min) によって製作した多孔質状態 (粉末間に空隙を意図的に残した状態) の供試材も用意、走査型電子顕微鏡 (ZEISS 社製 ULTRA55) にて観察した。

表 1 メカニカルアロイング直後の ODS-F82H 鋼粉末の化学組成

Element (wt%)													
C	Si	Mn	Cr	W	Ta	V	Ti	Y	O	N	Total Al	Insol. Al	Ar
0.16	0.02	0.02	8.18	1.92	0.08	0.21	0.17	0.26	0.15	0.011	0.038	< 0.001	0.006

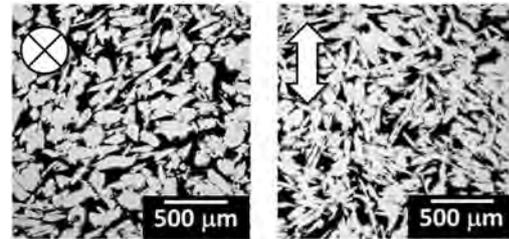
3. 結果および考察

まず表 2 にメカニカルアロイング粉末をサイズ分けして化学組成を分析した結果を示した。サイズ分けは 45 μm より小さいもの、45 μm 以上 125 μm 以下のもの、および 125 μm より大きいものの 3 種類として、それぞれ Small、Medium、および Large という ID とした。最も特徴的なことはサイズ変化に従って酸素量に変化していることである。最も表面積の大きくなる Small の酸素量が最も高く、順に Medium、Large とサイズが大きくなるに従って、つまり、表面積が小さくなるに従って酸素量が低くなった。ODS 鋼において酸素量はクリープ強度特性と関係のある重要パラメータであることがわかっており [1]、サイズ分けによってこの酸素量に変化することを示したこの結果は、これまで考慮されたことのなかったメカニカルアロイング粉末のサイズ制御が材料特性制御に対して重要となることを意味するものである。また最も表面積が小さく酸素量が低い Large においてもその量がメカニカルアロイング直後 (表 1) より高いことは、メカニカルアロイング後の粉末取り扱いについて可能な限り酸化を防止できるように雰囲気制御することが望ましいことを示す結果である。

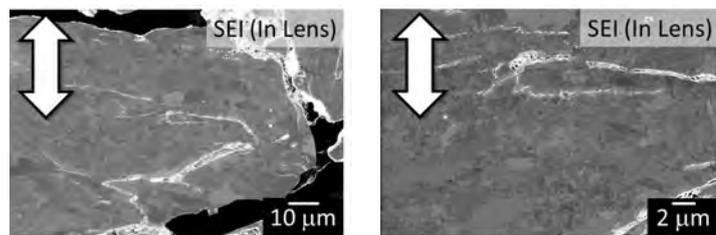
表 2 サイズ分け後の ODS-F82H 鋼粉末の化学組成

ID	Element (wt%)														Comment
	C	Si	Mn	Cr	W	Ta	V	Ti	Y	O	N	Total Al	Insol. Al	Ar	
Small	0.163	0.01	0.01	8.09	1.87	0.09	0.19	0.17	0.25	0.19	0.012	0.042	< 0.001	0.0072	< 45 μm
Medium	0.161	0.01	0.01	8.12	1.88	0.09	0.19	0.17	0.26	0.17	0.012	0.042	< 0.001	0.0074	45 - 125 μm
Large	0.163	0.01	0.01	8.11	1.88	0.09	0.19	0.17	0.26	0.16	0.014	0.043	< 0.001	0.0075	> 125 μm

図 1(a)には Large を放電プラズマ焼結にて多孔質体状態とした場合の組織を示した。加圧方向は図中の左上に示している。メカニカルアロイング粉末は一般にフレーク状であるがこの形状を反映した焼結状態である。著者らの成果によれば焼結体の旧粉末表面はクリープ破壊と関連することがわかっており[2]、ここで確認されたような等軸ではない粉末形状(旧粉末表面の状態)はクリープ強度特性に異方性が生まれる原因の一つになると考えられる。図 1(b)に粉末内の母相に注目したインレンズ型高感度検出器による二次電子像(SEI: Secondary Electron Image)を示した。一つの粉末内に結晶粒の細かい部分と粗大な部分の2種類の母相があることがわかる。ODS-F82H 鋼が含まれる8-9Cr系ODS鋼は単相鋼と2相鋼があり後者の方がクリープ強度特性に優れることがわかっているが[1]、2相のそれぞれに対応するような単相の粉末が2種類存在するのではなく、1種類の粉末に2相存在することがわかったことは、今後のクリープ強度特性の向上のために有用な情報である。これは母相の存在形態がクリープ変形・破壊挙動と関連するからである[3]。



(a) 粉末の焼結状態



図(b) 粉末内の母相

図 1 放電プラズマ焼結した ODS-F82H の組織

参考文献

- [1] S Ohtsuka, et al., J. Nucl. Mater. 329-333 (2004), 372-376.
 [2] H. Sakasegawa, et al., Fusion Eng. Des. 81 (2006), 1013-1018.
 [3] K. Shinozuka, et al., J. Nucl. Mater. 417 (2011), 233-236.

4. まとめ

核融合原型炉用として注目されている ODS-F82H 鋼について報告例が限られているメカニカルアロイング粉末状態のキャラクタリゼーションを実施した。これより粉末サイズおよび形状がそれぞれクリープ強度特性の重要な制御パラメータの一つの酸素量およびクリープ変形・破壊挙動の異方性に影響を及ぼす可能性を明らかとして、これが大量製造時も考慮すべき支配因子になり得ることを示した。

5. 本年度 発表リスト

今年度は該当なし(次年度以降に予定)。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 25820453 の助成を受けたものです。

先進接合法により製作した 低放射化フェライト鋼接合部の腐食特性評価

中島基樹¹, 廣瀬貴規¹, 谷川 尚¹, 木村晃彦²

¹日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

核融合ブランケット構造材料の開発は、CO₂ ゼロエミッション核融合発電の高効率化および早期実現を左右する重要な課題の一つである。核融合ブランケットコンポーネント製作のために不可欠な接合技術として、摩擦攪拌接合法やファイバーレーザー溶接等の先進溶接法を低放射化フェライト鋼の接合に適用し、接合部の腐食挙動を調査し、その健全性を評価することを主目的とする。今年度は接合部の特性評価の比較データ取得を目的として、接合部を含まない低放射化フェライト鋼の腐食挙動、特に流動加速腐食への DO の影響に着目し、流動高温高压冷却水と低放射化フェライト鋼の共存性の評価を実施した。

2. 方法

供試材は低放射化フェライト鋼 F82H を用いた。試験は静水環境では 25×25×1mm の平板状試験片、流動模擬環境では直径 100mm、厚さ 5mm の回転円盤試験片をそれぞれ用いた。腐食試験は温度 300℃、圧力 15MPa、溶存酸素濃度 (DO) 20ppb、1ppm、3ppm、8ppm に制御したオートクレーブ中にて実施した。回転円盤腐食試験では円盤の回転速度を 1000rpm とし、試験片の端部において最大で 5m/s の周速度を与えた。重量変化は精密天秤を用いて試験前後の測定によって求めた。併せて、X 線回折装置 (XRD)、走査電子顕微鏡および電子線マイクロアナライザ (EPMA) により腐食生成物を分析した。

3. 実験結果および考察

溶存酸素量 20ppb から 8ppm の範囲で取得した、静水環境並びに流動環境での試験片重量の経時変化を図 1 及び 2 に示す。静水環境ではいずれの試料においても、時間の増加に伴い試験片重量は増加した。環境中の DO が増加するに従い、わずかながら重量変化は小さくなる傾向が認められた。流動環境では、DO20ppb から DO3ppm までは重量が減少したが、DO8ppm では流動環境においても重量増となり、静水試験の結果と大きな違いが認められなかったことから、流動の影響を無視できることを実験的に明らかとした。

DO20ppb、1ppm、8ppm の環境で腐食試験後の回転円盤試験片の EPMA による腐食生成物の元素分布分析結果を図 3 に示す。重量が減少していた DO20ppb 並びに 1ppm の試験片では鉄の溶出により形成される鉄欠乏層が認められるのに対して、重量が増加していた DO8ppm の試験片では、そのような腐食層は認められなかった。表面酸化物について XRD で同定した結果、DO20ppb では FeCr₂O₄ のみが検出され、DO1ppm および 8ppm で

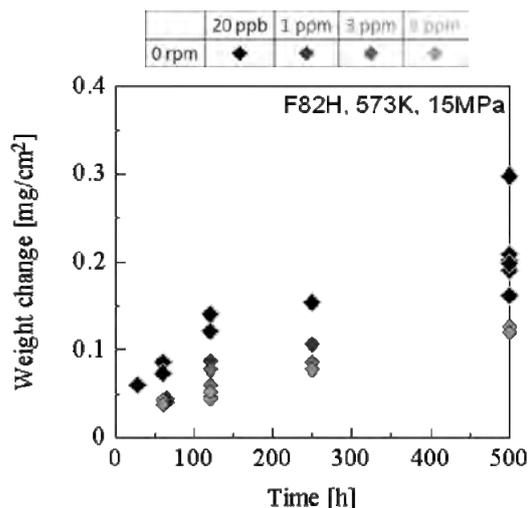


図 1 高温高压水中における F82H の重量変化 (300℃ /15MPa/20ppb~8ppmDO)

は Fe_2O_3 と FeCr_2O_4 が認められた。静水試験片では上記の酸化物に加え Fe_3O_4 が存在したことから、流動環境下では Fe_3O_4 が形成されないか、形成されても直ちに溶出してしまうことが示唆された。さらに静水環境での酸化物中に占める Fe_3O_4 の割合は低 DO の方が大きくなっていったことから、低 DO の回転円盤で見られた重量減少は酸化物中の Fe_3O_4 の割合と関係があると考えられた。

4. 今後の予定

今年度の結果より、接合部を含まない F82H の高温高压水中における腐食挙動への DO の影響について知見を得るとともに、流動加速腐食への感受性及び腐食減肉量低減の指針を得た。今後、これらの知見に基づき、先進接合法により製作した接合部の腐食特性評価を進める予定である。

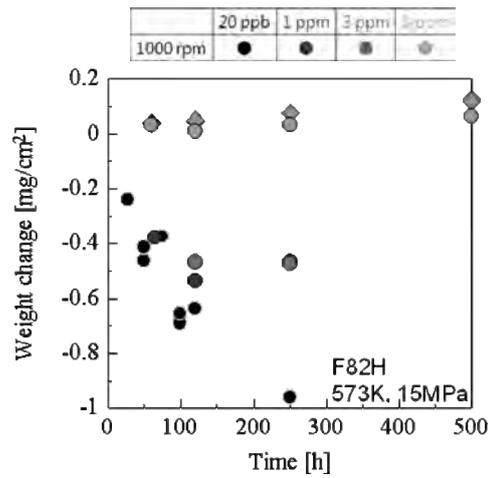


図2 酸素添加高温高压水中における F82H の重量変化 (300°C/15MPa/1ppmDO)

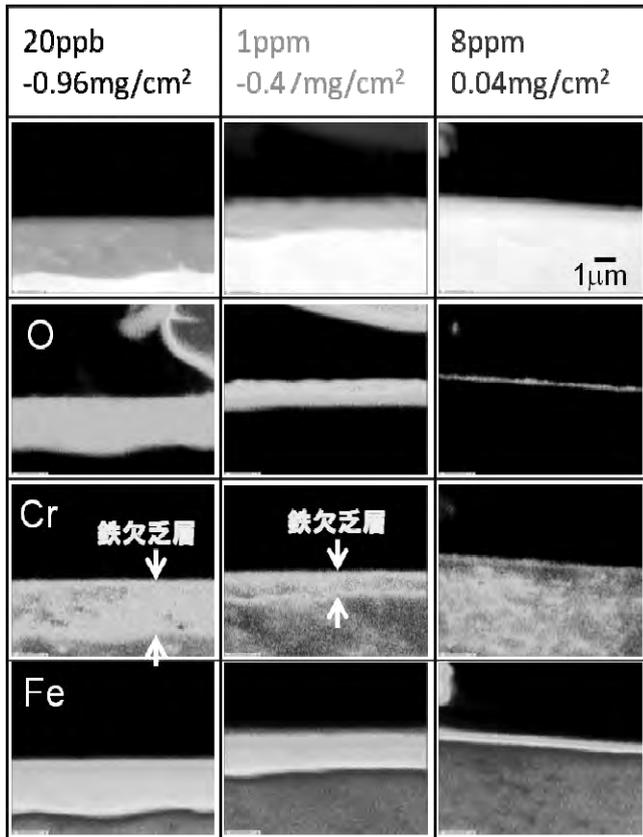


図3 F82H 表面に形成された腐食生成物の EPMA 分析結果 (300°C/15Mpa 高温高压水中試験)

中赤外自由電子レーザーによるワイドギャップ半導体における選択的格子振動励起

蜂谷 寛¹, 大垣英明², 佐川 尚¹, 全 炳俊², 吉田恭平^{2,*}, 加賀屋宗志¹

¹京都大学大学院エネルギー科学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

* 日本学術振興会 特別研究員

1. 研究背景

SiC, TiO₂, ZnO 等はワイドギャップ半導体とよばれ、次世代パワーデバイスや光触媒、発光デバイスなどへの応用が期待されている。これらの材料の電子移動などの物性は、赤外域に振動モードを有する格子振動(フォノン)と電子の相互作用が重要な役割を担っていると考えられており、選択的なフォノン励起により特定の格子振動が及ぼす電子状態への影響を解明することが可能であると考えられるほか、相変化や電荷移動を積極的に利用した相変化制御の可能性も示唆される。

しかしながら、従来の熱的なフォノン励起では、特定の格子振動を選択的に励起することは困難であり、熱的なフォノン励起に代わる技術が必要となる。そこで、われわれは、中赤外領域の光がフォノンの吸収領域に対応していることに着目し、波長可変な中赤外レーザーで光学的(非熱的)にフォノン励起を行い、さらにアンチストークスラマン散乱測定法を用いて中赤外レーザーによる選択的フォノン励起を直接的な手法で実証することを目的とし、実験を行った。

2. 実験手法

単結晶 ZnO(1-100)面を用い、極低温または室温においてラマン散乱およびフォトルミネッセンス(PL)測定を行った。さらに、冷却したサンプルに、ZnO のラマン・赤外活性である光学フォノンモードに対応する波長に調整した中赤外パルスレーザー (KU-FEL)、およびラマン散乱測定用のプローブ光 (Nd-YAG レーザー第 2 高調波: 532 nm) を同時照射した。

3. 実験結果

本実験の目標とする ZnO における選択的格子振動励起の期待される振動モードは 590 cm⁻¹ 付近に存在し、波長 17.0 μm, エネルギー 73.2 meV に対応する。したがって、プローブ光 532 nm, 2.33 eV 励起による Stokes および Anti-Stokes 光は、2.33±0.7 eV すなわち 516 nm (Anti-Stokes) および 549 nm (Stokes) に観測される。

現在までのところ、これらの信号を高い S/N 比で観測するには至っていないため、より広い波長範囲でのスペクトルの確認を行った(図 1)。

400 nm 付近に、典型的な励起子発光の鋭い発光バンドが認められ、不純物や欠陥に由来する幅広い発光(参照: [発表論文])があわせて観測され、これがラマン散乱信号に重なっていることがわかった。

これらの PL バンドの発光強度は、プローブ光による励起強度の二乗に比例することが確かめられたため、532/2 = 266 nm の二光子励起による ZnO からの PL 信号がラマン散乱信号観測における S/N 比を低下させていることが示唆された。

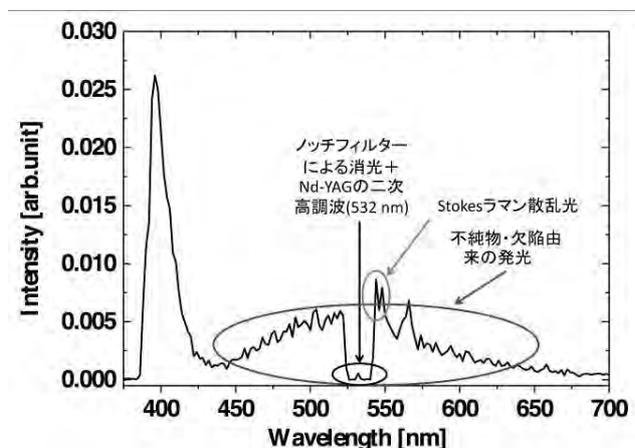


図 1 室温における ZnO(1-100)面からの PL および散乱光スペクトル

今後は、プローブ光励起強度の最適化、より欠陥の少ない単結晶試料の調製などのほか、Nd:YAG レーザー 1064 nm をプローブ光としてハイパーラマン散乱で生じる 532 nm 付近の信号光を測定することにより、S/N 比の改善を目指す予定である。

[口頭発表]

Muneyuki KAGAYA, Kyohei YOSHIDA, Heishun ZEN, Kan HACHIYA, Takashi SAGAWA, Hideaki OHGAKI, “Mode-selective phonon excitation in wide-bandgap semiconductor by mid-infrared free-electron-laser”, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, Obaku Plaza, Kyoto University, Uji, Kyoto, Japan, September 30 - October 2, 2014 (ポスター)

村田智哉, 吉田恭平, 園部太郎, 全 炳俊, 蜂谷 寛, 梅村勇輔, 犬飼元晴, Sikharin Suphakul, Negm Hani, Konstantin Torgasin, 紀井俊輝, 増田 開, 大垣英明, “ポンププローブ実験に向けた中赤外 FEL とピコ秒レーザーの同時照射システムの開発”, 第 24 回 (平成 26 年度) 日本赤外線学会研究発表会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス学術交流会館, 2014 年 11 月 27-28 日 (ポスター)

吉田恭平, 園部太郎, 全 炳俊, 蜂谷 寛, 村田 智哉, 梅村勇輔, 犬飼元晴, Sikharin Suphakul, Negm Hani, Konstantin Torgasin, 紀井俊輝, 増田 開, 大垣英明, “アンチストークスラマン散乱分光法を用いた中赤外自由電子レーザーによる選択的格子振動励起の直接観測”, 第 24 回 (平成 26 年度) 日本赤外線学会研究発表会, 大阪府立大学中百舌鳥キャンパス学術交流会館, 2014 年 11 月 27-28 日 (ポスター)

吉田恭平, 園部太郎, 全 炳俊, 蜂谷 寛, 村田智哉, 梅村勇輔, 犬飼元晴, Sikharin Suphakul, Negm Hani, Konstantin Torgasin, 紀井俊輝, 増田 開, 大垣英明, “アンチストークスラマン散乱分光を用いた中赤外自由電子レーザーによる選択的格子振動励起の直接観測”, 第 28 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス, 2015 年 1 月 10-12 日

[論文発表]

Kyohei Yoshida, Taro Sonobe, Heishun. Zen, Kan Hachiya, Kensuke Okumura, Kenta Mishima, Motoharu Inukai, Hani Negm, Konstantin Torgasin, Mohamed Omer, Ryota Kinjo, Toshiteru Kii, Kai Masuda, Hideaki Ohgaki, “Effect of microwave irradiation on the electronic structure of ZnO”, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 投稿中

色素－金属ナノ粒子複合膜における光電流に及ぼす 磁場と金属ナノ粒子の効果

米村弘明¹, 新見友樹², 松元竜児², 山田 淳¹, 坂口浩司³

¹九州大学大学院工学研究院応用化学部門

²九州大学大学院工学府材料物性工学専攻

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

現在使用されているシリコン材料を用いた太陽電池に対し、光吸収層（光電変換層）に有機化合物を用いた有機薄膜太陽電池が大学や企業において活発に研究されている。今後、有機薄膜太陽電池は実用化されると考えられている。ただし、問題点は低いエネルギー変換効率と劣化に対する耐久性が低いことである。

我々はこれまで、様々なドナー（D）-アクセプター（A）連結化合物を用いて光誘起電子移動反応を研究し、光生成ピラジカルの減衰速度に対する磁場効果を検討してきた。また、光機能材料への応用として、導電性ポリマーやD-A連結化合物を用いた光電気化学反応に対する磁場効果も報告してきた。これらの研究は、有機薄膜太陽電池の変換効率向上を目指すために必要な反応機構の理解に有益な情報を与えることができる。

一方、金ナノ粒子（AuNP）や銀ナノ粒子（AgNP）などの金属ナノ粒子は局在表面プラズモン共鳴（LSPR）という光学特性を持つことが知られ、LSPRによる増強電場が有機薄膜太陽電池の変換効率向上に有用なことが報告されている。この研究背景を踏まえ、我々もポルフィリン-AgNP複合膜の光電流に及ぼすAgNPの影響について報告してきた。さらに、ポルフィリン-ビオローゲン連結化合物（ZnP(6)V）-金属ナノ粒子（AuNP及びAgNP）複合膜において、分子内電子移動とLSPRの共同効果によって、ポルフィリン膜よりも大きな光電流が観測できることも報告している。そこで、本研究ではlayer-by-layer吸着法とLangmuir-Blodgett法を組み合わせることでZnP(6)V-AgNP複合膜を作製し、アノード光電流に及ぼす磁場と金属ナノ粒子（AgNP等）の効果を検討したので報告する。

2. 実験

Langmuir-Blodgett法によって、親水化したITO基板にZnP(6)VまたはZnP(6)ABとアラキジン酸(AA)(図1)の混合単分子膜を固定化した(ZnP(6)V/ITO)。次に、ZnP(6)V/ITOまたはZnP(6)AB/ITOをポリエチレンジアミン(PEI)水溶液に浸漬し、PEIを吸着させた(PEI/ZnP(6)V/ITOまたはPEI/ZnP(6)AB/ITO)。正電荷を持つこれらの基板を、負電荷を持つクエン酸保護AgNP(粒径50nm)の水溶液に浸漬し、静電相互作用によるlayer-by-layer吸着法によってAgNPを固定化してZnP(6)V-AgNPとZnP(6)AB-AgNP複合膜(AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITOとAgNP/PEI/ZnP(6)AB/ITO)を作製した。同様の方法によって、比較膜としてPEI/ZnP(6)V/ITOおよびPEI/ZnP(6)AB/ITOを作製した。これらの修飾電極について、3極式セルを用いて光電流と光電流に対する磁場効果を測定した。磁場効果は、光電流値の磁場による変化率 $Q=[(I(B)-I(0))/I(0)] \times 100; \%$ 値で評価した。

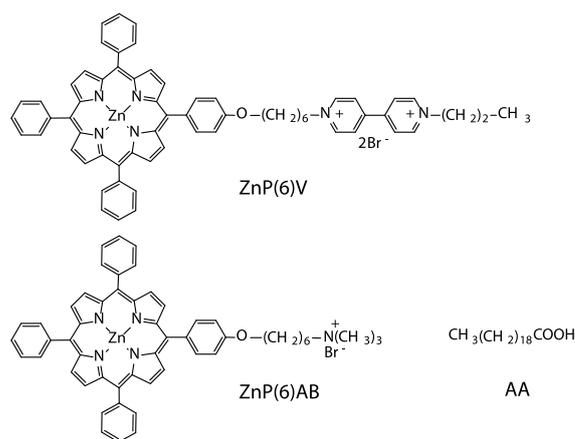


図1 用いた化合物の化学構造式

3. 結果と考察

修飾電極に光照射を行うと安定なアノード光電流を観測できた。これらの修飾電極のアクションスペクトルは亜鉛ポルフィリン (ZnP) の吸収と対応し、これらの修飾電極の光電流は ZnP 光励起によって起こっている事がわかった。光電流は次の順序で大きくなった (AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO > AgNP/PEI/ZnP(6)AB/ITO > PEI/ZnP(6)V/ITO > PEI/ZnP(6)AB/ITO) (図 2)。

AgNP/PEI/ZnP(6)AB/ITO における PEI/ZnP(6)AB/ITO (参照系) に対する光電流の増加は AgNP の局在プラズモン共鳴による増強電場の効果と考えられる。加えて、AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO における PEI/ZnP(6)AB/ITO (参照系) に対する大幅な光電流の増加は AgNP の局在プラズモン共鳴による増強電場と分子内電子移動反応の共同効果と考えられる。これらの結果は以前のカソード光電流が観測されたスピンコートで作製した ZnP(6)V-AgNP 複合膜での結果と良く一致した。

次に、これらの修飾電極における光電流に対する磁場効果を測定した (図 3)。AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO と PEI/ZnP(6)V/ITO では磁場を印加すると光電流が増加する磁場効果を観測できた。これらの磁場効果は以前の ZnP(6)V/ITO 修飾電極の結果と一致した。これに対して、AgNP/PEI/ZnP(6)AB/ITO と PEI/ZnP(6)AB/ITO では光電流に対する磁場効果は観測できなかった。以上の結果より、本研究の磁場効果は光生成ラジカル対によって起こっていると考えられ、磁場効果はラジカル対機構によって説明できた。

PEI/ZnP(6)V/ITO では Q 値は磁場の増加に伴って徐々に増加し、約 0.3 T でほぼ一定になった。これに対して、AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO では Q 値は磁場の増加に伴って急に増加し、約 0.15 T でほぼ一定になった。磁場効果の大きさを示す最大の Q 値 (Q_{max}) は AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO の方 ($Q_{max} \sim 40\%$) が PEI/ZnP(6)V/ITO ($Q_{max} \sim 25\%$) より大きくなった。言い換えれば、AgNP を加えることに、磁場効果が増大した。

以上より、AgNP は光電流を増大させると共に、光電流に対する磁場効果を増大させた。

今後は、AgNP の代わりに AuNP を用いて、同様な ZnP(6)V-AuNP 複合膜を作製し、アノード光電流に及ぼす磁場と AuNP の効果を検討する予定である。

[口頭発表リスト]

米村弘明、新見友樹、松元竜児、山田淳，“ポルフィリン-ビオローゲン連結化合物-金属ナノ粒子複合膜における光電流に及ぼす磁場と金属ナノ粒子の効果”，第 9 回日本磁気科学学会年会，平成 26 年 11 月 13-14 日，高山市民文化会館

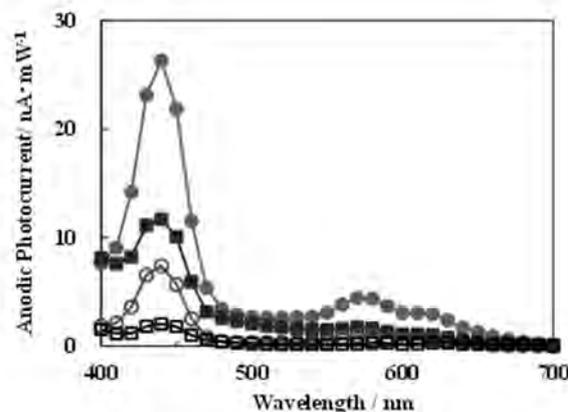


図 2 光電流アクションスペクトル
[AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO (●), AgNP/PEI/ZnP(6)AB/ITO (■), PEI/ZnP(6)V/ITO (○), PEI/ZnP(6)AB/ITO (□)]

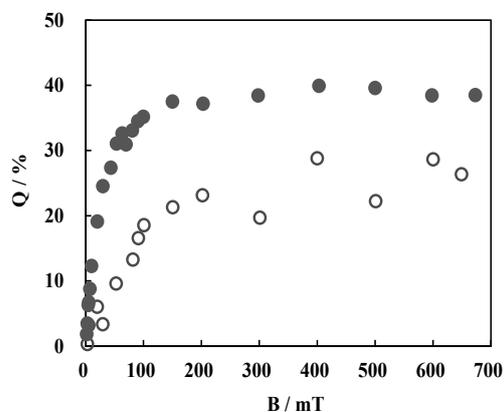


図 3 Q 値の磁場強度依存性
[AgNP/PEI/ZnP(6)V/ITO (●), PEI/ZnP(6)V/ITO (○)]

狭帯域検出器を用いたコヒーレント放射光出力測定による 電子バンチ長評価の研究

清 紀弘¹, 大垣英明², 全 炳俊²

¹産業技術総合研究所計測フロンティア研究部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

KU-FEL のような線形自由電子レーザー (FEL) 装置では、高い FEL 利得を得るために短パルスかつ高電荷の電子ビームを発生している。このような電子ビームは、テラヘルツ帯において高強度のコヒーレント放射も発生することが可能である。テラヘルツ帯のコヒーレント放射は、バンチ形状に応じたスペクトルを有しており、スペクトル測定からバンチ長を評価した報告が既に幾つか行われている。しかし、バンチ形状がガウス分布に近似できる場合は広い波長域で強度スペクトルを測定する必要はなく、形状因子が急激に変化する帯域において強度変化を測定することで、簡易的にバンチ長を評価することが可能である。しかも高速応答の検出器を利用できるため、マクロパルス内におけるバンチ長変化を計測することが可能である。バンチ長は FEL 利得に影響を与える重要な因子である。マクロパルス内におけるバンチ長の時間発展を計測して加速器運転にフィードバックを行えば、FEL の安定発振に貢献することを期待できる。昨年度はアンジュレータ上流の偏向磁石から射出される高強度コヒーレント放射光 (CSR) の観測に成功した。今年度は、その CSR の放射特性を明らかにするため、Michelson 干渉計を構築し、CSR のスペクトル測定を実施した。

2. CSR 観測に適した Michelson 干渉計の構築

CSR を用いて電子バンチ長を評価するには、CSR スペクトルが極大になる周波数付近にて強度を測定する必要がある。このため、CSR スペクトルの概要を測定によって明らかにする必要がある。我々が観測に成功したアンジュレータ上流偏向磁石の 30 度偏向付近では、電子ビーム輸送計算から rms バンチ長は 1~2ps 程度であると評価されている。この場合 CSR 理論による計算では、CSR スペクトルは 0.1~0.2THz の周波数帯で極大になる。

そこで、0.1THz 付近の周波数領域でスペクトル測定が可能な Michelson 干渉計を構築することにした。Michelson 干渉計の概要を図 1 に示す。CSR は石英窓から大気中へ射出された後、光源点から 0.5m の位置に設置された焦点距離 0.5m の凹面鏡によって平行光束化され、Michelson 干渉計に入射する。ビームスプリッタには厚さ 0.1mm のサファイア基板を使用した。ミリ波領域におけるサファイアの屈

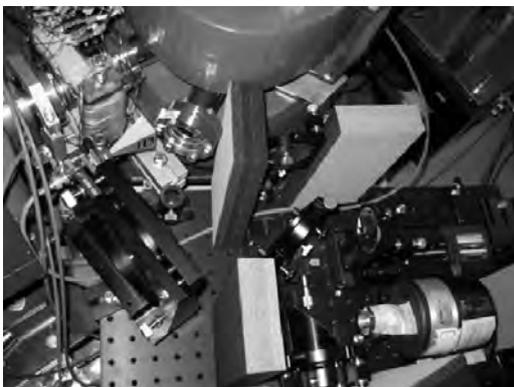


図 1 アンジュレータ上流偏向磁石の 30 度偏向ビームポートに設置した CSR スペクトル計測システム

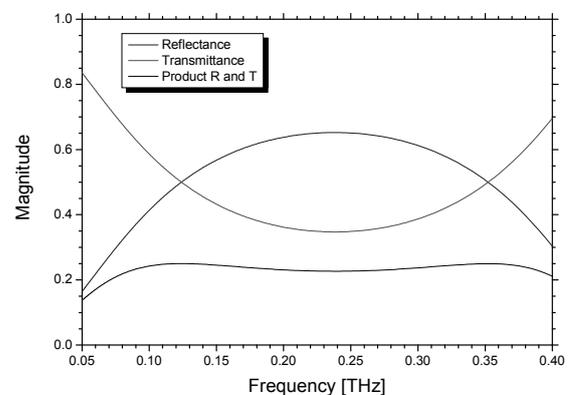


図 2 サファイアビームスプリッタの光学特性

折率は 3.1 と高く、反射率が高くなるのでビームスプリッターに適している。また厚さを 0.1mm に選択することによって、図 2 が示すように 0.1~0.4THz の周波数帯で反射率と透過率の積がほぼ平坦になる。Michelson 干渉計を通過した CSR は焦点距離 153mm の放物面鏡によって集光され、焦電検出器 (Gentec-EO Inc., QE8SP-I-MT-BNC) にて放射強度が測定される。この検出器はミリ波帯までフラットな検出効率を有し、感度は 30V/mJ である。

KU-FEL の電子ビームはマクロパルス毎の電荷量のばらつきが大きい。そこで石英窓の付近に G-band ダイオード検波器を配置して、真空容器内で散乱された CSR 強度を測定した。焦電検出器の出力を検波器出力で規格化し、より安定なインターフェログラムを取得した。

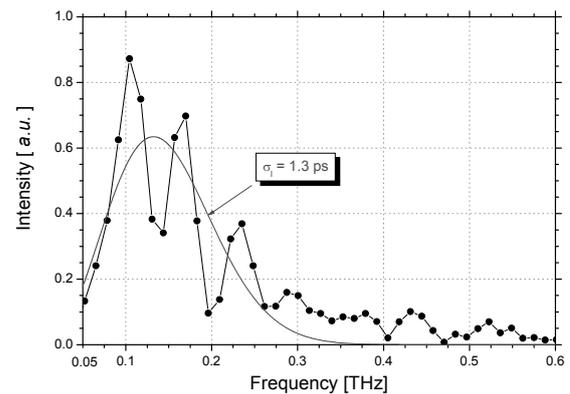


図 3 測定された CSR スペクトル (実線は理論値)

3. CSR スペクトル

エネルギー 35MeV、電流 0.6mA の電子ビームを使用して CSR スペクトルの測定実験を行った。可動鏡を 0.05mm 間隔で移動してインターフェログラムを計測し、高速フーリエ変換を行うことで CSR スペクトルを計算した。図 3 に計算した CSR スペクトルを示す。光路長±5mm のところに真空容器にて反射した成分による干渉が観測されたため、スペクトルには 60GHz 周期の変調が見られるが、0.12THz 付近に極大があることがわかる。CSR スペクトルから評価した rms バunch長は 1.3ps であり、電子ビーム輸送計算による評価と一致していた。

一方で測定された CSR スペクトルは、0.3THz を超える周波数帯にもピーク強度の 10% 程度の放射強度があることを示していた。電子バunch形状がガウス分布ではない場合、高周波成分が強く放射されるので、バunch形状による影響が考えられる。また、電子バunchはアンジュレータ上流偏向磁石内で 0.5ps 程度まで磁気圧縮される。観測した 30 度偏向の位置よりもさらに短パルス化した電子バunchが放射した CSR が真空容器内で反射され、干渉計まで届いている可能性もある。

4. まとめ及び今後の展開

KU-FEL の CSR スペクトル測定に適した Michelson 干渉計を構築し、アンジュレータ上流偏向磁石の 30 度偏向から射出される CSR スペクトルを計測した。CSR スペクトルは 0.12THz 付近に極大を有し、スペクトルから評価した rms バunch長は 1.3ps であり、電子ビーム輸送計算による評価と一致した。

CSR スペクトルの極大付近の放射強度はバunch長変化に影響を受けやすい。我々が所有する D-band 検波器及び G-band 検波器はそれぞれ 0.09~0.17THz と 0.14~0.22THz に感度帯域を有しており、バunch長計測に適している。FEL 発振の安定化を目指して、来年度は 2 帯域 CSR 測定によるバunch長評価について研究する予定である。

5. 発表リスト

[口頭発表リスト]

- ・ 清 紀弘、全 炳俊、大垣 英明、”京都大学 KU-FEL におけるコヒーレントシンクロトロン放射光源の開発”、第 24 回日本赤外線学会研究発表会、2014/11/28、堺市 (口頭発表)
- ・ 清 紀弘、全 炳俊、大垣 英明、”KU-FEL における高強度テラヘルツ帯コヒーレント放射光の観測”、JSR2015、2015/1/12、草津市 (ポスター発表)

[論文発表リスト]

- ・ N. Sei et al., “Complex light source composed from subterahertz-wave coherent synchrotron radiation and an infrared free-electron laser at the Laboratory for Electron Beam Research and Application”, J. Opt. Soc. Am., B **31** (2014) 2150.

特殊なマイクロ空間内で形成された 階層性分子組織構造の構造評価

沼田宗典¹, 中田栄司², 木村晃彦²

¹京都府立大学大学院生命環境科学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

機能性分子および高分子をナノメートルレベルで自在に組織化させ、機能性有機材料を創製しようとする試みが盛んになされている。生物内では様々な分子が複雑に相互作用しながらナノ-マイクロ-マクロを縦断する階層性を創出することで、ナノメートルの分子機能をマクロスケールへと増幅している。一方で人工機能分子系で階層性を自在に創出することは未だ困難であり、分子機能が材料機能として十分に発現できていない現状がある。マイクロメートルサイズの精緻な組織構造を効率的に創出し、同時にその内部の階層性を自在に制御することが、次世代の機能性ナノマテリアルの開発において極めて重要である。当グループではこれまでにマイクロフロー空間内の特殊な環境に着目し、機能性分子を自在に組織化する新たな分子集積システムの開発を目指してきた。これまでに、ペリレンビスイミド誘導体およびフラーレン誘導体からマイクロメートルサイズの超分子構造体の創製が可能であることを報告している。

マイクロフロー空間内では分子拡散がきわめて迅速かつ均質に起こり、分子レベルで均質な化学環境を再現よく、かつ容易に創りだすことが可能である。また、ナノリットル以下に分画化された溶液の連続的な制御系であり、原理的にはマイクロチャンネルを通過する全ての分子および超分子構造が同時に同一の化学環境を経験することになる。これまで当グループでは、こうしたマイクロフロー空間を分子集積場とすることにより、組織化する分子の振る舞いを時間・空間的に同期化できることを示してきた¹⁾。これにより、マイクロメートルサイズの一義的な超分子構造を一気に組織化することが可能となっている。本研究では、特に π 共役系分子の組織化に着目し、フロー溶液の流速、フロー方向に沿った溶媒極性の変化、層流内の流速分布などのマイクロ流体特有の性質が π 共役分子の組織化過程と得られるマイクロ組織構造に及ぼす影響について検討を行った。

2. 実験

まず、 π 共役系分子（ペリレンビスイミド誘導体(PBI)、ポルフィリン誘導体およびフラーレン誘導体(PCBM)）のTHF溶液を調製した。この溶液を直径約100 μm の十字形マイクロ流路の中央から、水を2つの側方導入口からそれぞれ導入し、十字路部位において導入した分子の迅速な組織化を行った(図1)。十字

路を一定間隔で複数配置したフローチャンネルを用いると、側方から導入する溶媒の極性を変化させることにより、フロー方向へ溶媒極性を段階的に制御できる。さらに、フローチャンネル内では流れに対して垂直方向に速度分布が存在する(図1挿入図)。マイクロフロー空間内では溶液は層流となり、導入した2液は混合することなく一時的な界面を形成し、この界面上で最初の組織化が起きると考えられる。まず本実験では、フロー方向への溶媒極性と最終流速の変化が、 π 共役系分子

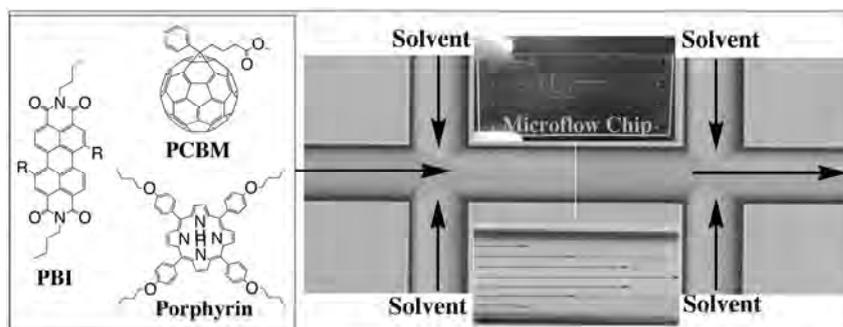


図1 本研究で用いた π 共役系分子の構造と多段型マイクロフローチャンネル(挿入図:マイクロフロー内の流速分布)

の自己組織化に及ぼす影響を精査した。さらに、中央溶液と側方溶液の流速比を変化させることにより、液-液（水/THF）界面の位置を流れに対して垂直方向にシフトさせ、流速分布が分子の自己組織化に与える影響についても検討を行った。キャピラリーを通して流出した溶液をサンプル管に分取し、UV-VIS、蛍光スペクトル、X線散乱測定およびSEM, TEMによる観察を実施した。

3. 結果・考察

まず、フロー方向に沿った溶媒極性の変化（極性グラジエントの勾配）が π スタッキングに及ぼす影響について、PBI誘導体を用いて検討を行った。可視・紫外、蛍光スペクトル測定およびX線散乱測定の結果、グラジエントの勾配が急になるに従い、PBI誘導体の会合様式がH会合からJ会合へと変化することが示された。一定のグラジエント下では流速が上昇するにつれて、J会合体の形成が優勢になる傾向も確認された。SEM観察の結果、グラジエントの勾配が緩やかな場合は、柔軟なファイバー構造であったのに対し、急激な極性の変化によって剛直なテープ状構造へと変化することが明らかとなっている（図2(a)(b)²⁾。こうしたフロー方向への溶媒極性の段階的な変化は、 π スタッキングの速度に影響を与えていると推察される。会合速度の制御が、分子のパッキング様式と組織構造に変化をもたらしたと考察できる。この効果は、ポルフィリンなど2次元組織能を持つ分子では、シート構造のサイズ（面積）や厚みの違いとして現れることも明らかとなっている（図3³⁾。

次に、フロー溶液内の流速分布が組織構造に与える影響を検証した。チャンネル内壁との摩擦により、速度勾配はチャンネル中央付近で最小、チャンネル内壁近傍で最大となる。水/THF界面を中央から側方へとシフトさせると、速度勾配の変化に伴いPBI誘導体の組織構造が屈曲することが明らかとなった（図2(c)(d)²⁾。以上の様に、マイクロ流路内に形成される特殊なフロー環境を分子集積場とすることにより、分子間相互作用の精密な制御を通してユニークなマイクロ組織構造体の創製が達成された。

4. 発表リスト[論文発表リスト]

- (1) Kinetically controllable supramolecular polymerization through synchronized activation of monomers, M. Numata, R. Sakai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **87**, 858-862 (2014) (BCSJ Award Article).
- (2) Synchronous activation of π -conjugated molecules toward self-assembly: precise controlling the hysteresis of the metastable state along microflow, M. Numata, T. Kozawa, R. Nogami, K. Tanaka, Y. Sanada, K. Sakurai, *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, **2015**, in press.
- (3) Two-dimensional assembly based on flow supramolecular chemistry: kinetic control of molecular interaction under solvent diffusion, M. Numata, T. Kozawa, *Chem. Eur. J.*, **20**, 6234-6240 (2014).

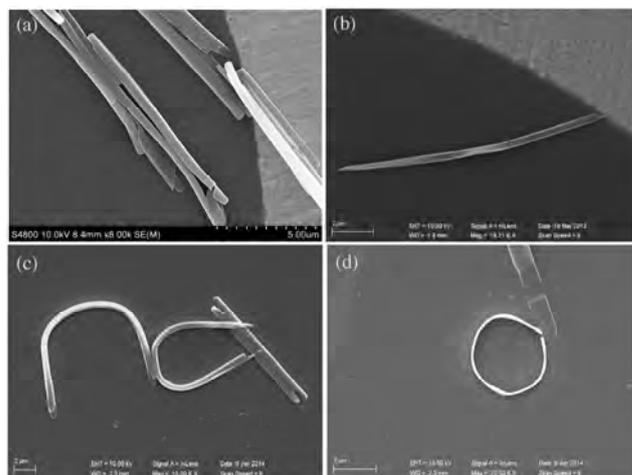


図2 マイクロフロー空間に沿った(a):急激な極性変化,(b):緩やかな極性変化によって形成されたPBI誘導体の組織構造体;(c)フロー内の流速勾配が創り出す屈曲したテープ状構造体と(d)リング状構造体(SEM像)。

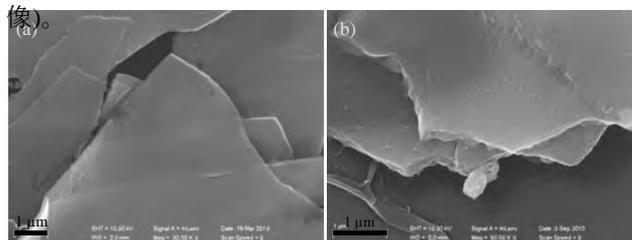


図3 フロー空間に沿った極性グラジエントによって創出された厚みが制御されたポルフィリン誘導体のシート構造体(SEM像)。

翻訳開始因子複合体における 情報伝達機構の構造生物学的研究

尾林栄治¹, 浦野 健¹, 浅野 桂², 片平正人³, 永田 崇³

¹島根大学医学部

²カンザス州立大学

³京都大学エネルギー理工学研究所

細胞内におけるタンパク質合成を制御する機構を正確に理解することは、単に生物の基本的生命活動機構を明らかにするというだけでなく、がんやウイルス感染症対策という医学的見地、さらに、バイオ燃料を産出する植物や微生物の高度化によるエネルギー工学への応用という観点から非常に重要である。本研究では、タンパク質合成開始を担うタンパク質翻訳開始因子複合体 (eIF) の立体構造解析を行うことで、反応機構の理解と新規抗がん剤、抗ウイルス剤、及びバイオ燃料を効率的に生産する系の開発に向けて、構造基盤を提供することを目指す。

eIF は、生物の基本的生命活動にとって重要なものであるだけでなく、新規抗生物質やウイルスやがんに対する新規薬剤開発のターゲットとしても近年注目を集めている。C 型肝炎などのウイルスのゲノム RNA は、自己のタンパク質を宿主細胞に優先的に合成させるために eIF に直接結合する能力を持つ。そのため、eIF の働きを正確に理解することで、新たな抗ウイルス薬設計の可能性も広がる。また、がん細胞では翻訳開始因子が多く発現され、その翻訳開始因子の阻害剤ががんによる腫瘍を小さくさせることが報告されており、eIF は抗がん剤のターゲットとなっている。

さらに、eIF はタンパク質翻訳を制御している複合体であり、本研究によりタンパク質の翻訳開始のメカニズムが明らかになれば、様々な生物細胞内でのタンパク質発現をコントロールすることも可能となる。つまり、バイオ燃料を産出する植物及び微生物において、特定の酵素を大量に発現させることで、バイオ燃料の効率的な生産も期待される。このように本研究では、ゼロエミッションエネルギーのためのタンパク質大量発現制御も視野に入れ、eIF の立体構造解析を行い、細胞内タンパク質発現制御を行うための分子基盤を提供する。

私たちは、eIF 複合体の中でも翻訳開始地点の正確な認識に必須な eIF1 タンパク質を中心に、その相互作用と機能の関係を、貴研究拠点の超高感度検出器を備えた核磁気共鳴装置を用いた NMR 解析により明らかにすることを目的に研究を進めた。まず、eIF1 タンパク質の立体構造を NMR 法により明らかにした (図 1)。その構造は、これまでに報告されたものと良く似ているものの、肝心なリボソーム結合部位にわずかな違いが見られた。リボソーム結合モデルと比較することで、本研究で得られた立体構造がタンパク質翻訳開始機構においてより正確な構造を表していることが示唆され、より詳細な議論が可能になった。次に、eIF1 と相互作用する eIF3c および eIF5 との相互作用部位を、NMR 法により同定することを試みた。その結果、eIF3c は eIF1 の二つの領域で相互作用している可能性が示唆された (図 1)。また、部位特異的のアミノ酸置換変異体を用いた実験により、eIF1 の eIF3c への結合部位の一つの領域 (図 1 の K37 を含む領域) は、リボソームとの結合部位と同じであることがわかった。このことから、eIF1 は二つの領域を使って、同時にリボソームと eIF3c に結合できることが明らかになった。さらに、eIF5 存在下では eIF3c の結合部位が一つの領域に収束している様に観測されることから、eIF5 が eIF1 とリボソームとの相互作用を切り離しているのではないかということが考えられた。実際に eIF1 における eIF5 の結合部位を見てみると、リボソームが結合する K37 を含む領域

と eIF3c が結合する K56 を含む領域両方と重なっていた (図 1)。すなわち、eIF5 が eIF1 と相互作用すると、eIF1 はリボソームと eIF3c と相互作用できなくなり、リボソームから解離する。翻訳開始の際には、eIF1 がリボソーム-eIF1 複合体から解離することがすでに報告されており、本結果とよく一致する。本研究結果により、いかにして eIF1 がリボソームから解離させられるのか、eIF3c および eIF5 と共に説明できるメカニズムが明らかになった。今後は、この翻訳開始スイッチをコントロールするためにも、さらに詳細な eIF タンパク質間の相互作用部位の同定を進めて行く。貴研究拠点の超高感度検出器を備えた核磁気共鳴装置を利用した Cross-saturation 法による研究を行って行く予定である。

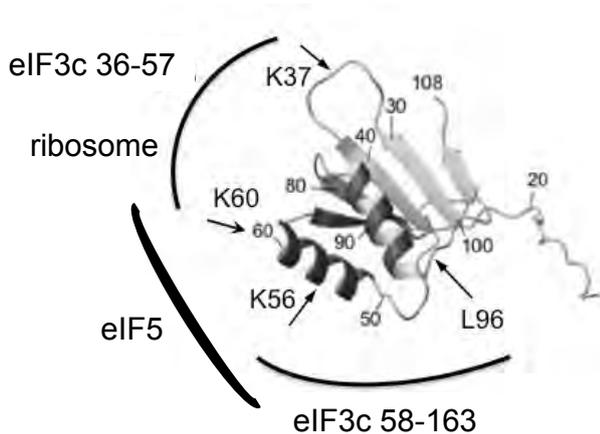


図 1 : eIF1 の立体構造と、eIF3c およびリボソームの相互作用領域

eIF1 の K37 を含む領域には、eIF3c の 36-57 とリボソーム両方が結合できる。eIF5 の結合領域は、リボソーム、eIF3c 結合領域とそれぞれオーバーラップしている。

1. 本年度 発表リストについて

[口頭発表リスト]

Eiji Obayashi, Takeshi Urano, Katsura Asano, Masato Katahira and Takashi Nagata

“Structural study of the mechanism of signal transduction in eukaryotic translation initiation factor complex”

第 5 回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム、ゼロエミッションエネルギー研究拠点国際シンポジウム

平成 26 年 9 月 30 日～10 月 2 日 京都大学宇治キャンパス 黄檗プラザ (ポスター発表)

[論文発表リスト]

なし

レーザーパルスの最適制御による 光化学反応の高効率化

大槻幸義¹, 中嶋 隆²

¹ 東北大学大学院理学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 序

平成 26 年度の研究目的は、近年開発が進んでいるテラヘルツ (THz) パルスを用いた分子配向制御である。立体化学の観点から、化学反応においては「分子の向き」の制御が重要であり、反応の高効率化に不可欠なステップである[1]。また、THz パルスの光子エネルギーは、赤外・可視光と比較して非常に小さい。制御に要するエネルギーの観点からも、本研究は光化学反応におけるゼロエミッションエネルギー研究貢献できると期待できる。しかし課題もある。配向制御に十分な電場振幅をもった THz パルスは現在、自由電子レーザーなど大型の施設でしか実現できていない。基盤技術の観点からは大きな制約である。そこで、THz パルスで不足する電場強度を、レーザーパルスと組み合わせることで補うことを考える。特に、波長 800 nm のレーザーパルスは、整形技術が発展しており制御された強電場を分子に印加できる。ただし、レーザーパルスの光振動数は、配向制御に直接関係する回転準位の遷移振動に比べて非常に大きいため、(分子の向きを区別できない) 誘起双極子を通して分子と相互作用する[2]。すなわち、より高い配向度合いの実現には「配向を制御できるが電場強度が十分ではない THz パルス」と「電場強度は十分大きい分子の向きは制御できないレーザーパルス」の最適な組み合わせを見出す必要がある[3]。このような物理・化学的な考察だけで解決が難しい問題に対しては、制御理論に基づくシミュレーションが有効である。そこで、オリジナル開発した非線形相互作用の最適制御シミュレーション[3-5]を適用し、THz パルスとレーザーパルスとの最適な組み合わせを明らかにする。その際、励起に用いる光源エネルギーの制約を考慮できるように、新たにパルス振幅・フルエンスを陽に指定できるようにシミュレーションを拡張した。

2. パルス振幅・フルエンス指定の最適制御シミュレーション

分子の配向制御法の有効性を議論する場合、CO 分子を用いることが慣例になっている。本研究でもそれに従い、剛体回転子 (回転定数 $B=1.92 \text{ cm}^{-1}$) で近似した CO 分子を考える。THz パルスとレーザーパルスはどちらも空間固定 Z 軸方向に直線偏光しているとする。THz パルスは電気双極子モーメント (μ) を通して、レーザーパルスは分極を通して分子を相互作用する。なお、THz パルス強度はそれほど大きくないので、分極相互作用への寄与は無視できる。ハミルトニアンは次式で表される。

$$H(t) = B\hat{J}^2 - \mu E(t) \cos \theta - \frac{1}{4} [(\alpha_p - \alpha_\perp) \cos^2 \theta + \alpha_\perp] [\varepsilon(t)]^2 \quad (1)$$

ここで、 \hat{J} は角運動量演算子、 α_p (α_\perp) は分子軸に平行 (垂直) な分極成分、 θ は分子軸とパルスの偏光方向のなす角、 $\varepsilon(t)$ はレーザーパルスの包絡線を表す。回転のダイナミクスは密度演算子 $\rho(t)$ の時間発展 (リウヴィル方程式) で記述され、初期状態はボルツマン分布で与えられる。

最適制御シミュレーションでは、最初に制御目的を定量化する。分子整列度合いは通常 $\cos \theta$ の期待値で定義される。そこで、制御時刻 t_f での制御度合いの最大化として定式化する。次の汎関数

$$F[E(t), \varepsilon(t)] = \text{Tr} \{ \rho(t_f) \cos \theta \} - \int_0^{t_f} \frac{dt}{hA(t)} [E(t)]^2 \quad (2)$$

の最大化問題として表現できる。なお、右辺第 2 項は、THz パルスエネルギーに由来するペナルティ

項であり、パラメータである正值関数 $A(t)$ により評価の度合いを調整する。(2)式に変分法を適用し、最適な THz パルスとレーザーパルスが従う設計方程式を導く。このパルス設計方程式は非線形の連立微分方程式で与えられ、我々が開発した単調収束が保証された繰り返し計算アルゴリズムにより数値的に解く。今回、計算の繰り返し計算ごとに、パルス振幅・フルエンスを計算する。それが目的の振幅・フルエンスよりも値が大きい(小さい)場合、ペナルティ評価を大きく(小さく)して値を調整する。これにより、パルス振幅・フルエンスを陽に指定したシミュレーションに拡張できる [3]。

3. 結果と考察

制御時間としては $t_f = 2T_{\text{rot}}$ を仮定する ($T_{\text{rot}} = 8.68$ ps は回転定数の逆数で定義される回転周期)。THz パルスの最大振幅の絶対値、 $E_{\text{max}} = 50$ MV/m \sim 150 MV/m、レーザーパルスのフルエンス $f_0 = 2.5$ J/cm² \sim 4.5 J/cm²、温度 $T = 0$ K \sim 10 K の範囲でシミュレーションを行い、最適な組み合わせを系統的に調べた。その結果、以下の共通の特徴を見出した [3]。①THz パルスのみの場合と比較して、レーザーパルスとの組み合わせで配向度合いを約 1.5 倍高めることができる。②最適な THz パルスは近似的にゼロ面積の 1 サイクルパルスである。③最適なレーザーパルスは 3 つのサブパルスから成る。典型例として、図 1 に $E_{\text{max}} = 100$ MV/m、 $f_0 = 4.0$ J/cm²、 $T = 5$ K の最適パルスを示す(参考のために初期入力パルスを波線で示す)。②は THz が共鳴励起を誘起しており、非共鳴な静電場成分は不要であると理解できる。レーザーパルスの③の特徴は、周波数ネットワーク機構 [5]により説明できる。周波数領域で考えると、3 パルス列は複数のラマン遷移(ラマンシフト)を誘起する振動成分を含み、それにより、THz パルスが生成した $\Delta J = \pm 1$ の重ね合わせ状態を更に励起し、配向に有利な回転波束を生成する。ここでシミュレーションされた最適パルスは現在の実験技術で実現可能であり、ゼロエミッションエネルギーに向けた光化学反応制御への応用を期待している。

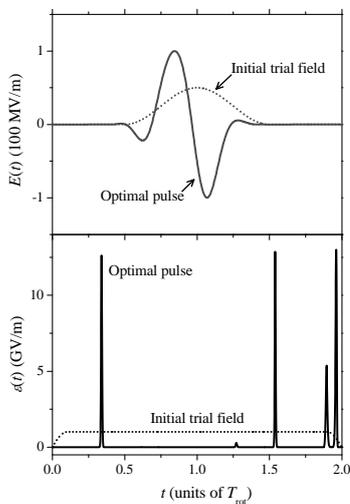


図 1 (上) 最適な THz パルスと (下) 最適なレーザーパルス。波線は計算に用いた初期パルス [3]。

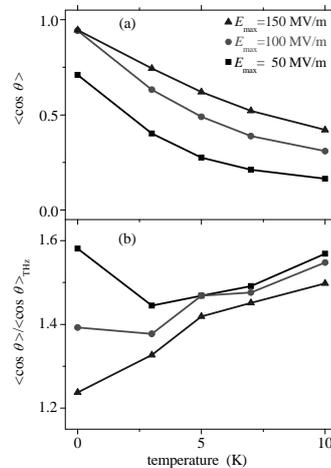


図 2 (a) 3 つの E_{max} に対して、最適化の結果達成できた配向度合いを温度のグラフとして表示。(b) レーザーパルスがない場合での最適化の結果で(a)の結果との比 [3]。

4. 参考文献 ([3]が平成 26 年度の主な共同研究成果)

- [1] R. N. Zare, *Angular Momentum* (Wiley, New York, 1988).
- [2] B. Friedrich and D. Herschbach, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 4623 (1995).
- [3] M. Yoshida and Y. Ohtsuki, *Phys. Rev. A* **90**, 013415 (2014) and references therein.
- [4] Y. Ohtsuki and K. Nakagami, *Phys. Rev. A* **77**, 033414 (2008)
- [5] H. Abe and Y. Ohtsuki, *Phys. Rev. A* **83**, 053410 (2011).

気液界面に照射された大気圧プラズマジェットが生成する 活性ラジカル計測

松浦寛人^{1,2}, 大西雄馬², コンメイ・サンティ², 陳 健², 門信一郎³

¹大阪府立大学地域連携研究機構放射線研究センター

²大阪府立大学大学院工学研究科

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 本研究の目的

中南米を原産地とするジャトロファ・カルカス（和名：南洋油桐）は、その種子に多量の油分が含まれていること、乾燥気候に強いこと、食用には適さないことなどから、軽油代替のバイオディーゼル燃料の原料として注目されている。しかし、ジャトロファオイルに含まれるフォルボールエステルは非常に強い発がん促進作用を持ち、バイオディーゼル精製過程で環境に放出されるという懸念がある。我々は、大気圧プラズマが液中に生成する活性酸素ラジカルによって効率的に分解されるという基礎実験結果を得ているが、この処理に用いるプラズマの計測はまだ不十分で、フォルボールエステル分解の詳細やラジカル生成量についてのデータも不足している。エネルギー理工学研究所で永年培われたプラズマ計測技術、中でも分光計測を適用することによりフォルボールエステル分解のメカニズムやラジカル生成の最適化のための基礎データを習得できると期待される。本年度は分光計測システムの整備と並行して、プラズマ源の改良によるラジカル生成量の増加と新しいラジカル計測法である白金触媒プローブ法の応用を進めてきた。

2. 大気圧放電プラズマ源の改良

我々はフォルボールエステル試料として、ジャトロファオイルより分離されたフォルボールエステル (JPEs) 及び市販のフォルボール 12-ミリスレート 13-アセテート (PMA) 標準試料を用いた。当初用いたプラズマ源はヘリウムガスを流したガラス管に巻かれたリング電極に低周波高電圧を印加し誘電体バリア放電で大気圧プラズマジェットを生成するものであった。フォルボールエステル水溶液界面をこのジェットで照射することにより、液中の過酸化水素濃度の増加とフォルボールエステルの分解が観測されている。フォルボールエステルの分解は液中に生成された短寿命の水酸基ラジカルによる開環反応によるものであり、未反応の水酸基ラジカルは過酸化水素に変わると考えられている。

しかし、PMA 水溶液に対しての処理効率は小さく、きわめて長時間の処理時間と多量のヘリウムガスが必要となると予想される。そこで、針状電極とそれによるコロナ放電を援用するプラズマ源を新たに試作し、より安価なアルゴンガスでも放電可能となるようにプラズマ源を改良した。図 1 は、このプラズマ源を用いて処理した液中の過酸化水素濃度の比較を示す。ヘリウムに比べてアルゴンの方がラジカル生成が多く、フォルボールエステルの分解も促進されることが示された。これは、放電中の高エネルギー電子の有無によると考えられている。

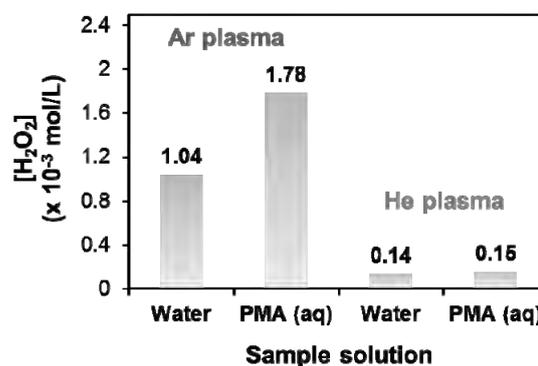


図 1 純水および PMA 水溶液液中にプラズマ照射で生成された過酸化水素濃度

3. 白金触媒プローブの基礎実験

プラズマ中で生成される活性ラジカル密度は通常、プラズマ放電を乱さない分光学的方法(OES)で間接的にモニターされている。しかし、放射捕獲や、電子エネルギー分布関数の熱平衡分布(マックスウェル分布)からのずれなどにより、大気圧放電プラズマにおける OES データの解釈が複雑化し、あるいは非常に困難になる場合があることが指摘されている。我々は様々なプラズマから対向面への熱流束を測定するサーマルプローブの研究を通して、この熱流束がプラズマパラメーターばかりではなく、プローブチップ素材の表面反応に依存することを見出した。特に、触媒作用を持つ白金などの金属を用いた場合、多量の活性ラジカルがプローブ表面で再結合し、結合エネルギー由来の大きな熱流束が計測できることが日本やスロベニアの研究者によって報告されている。

図2は現在検討中の触媒プローブの原理を示す。白金細線は外部電源より電流 I_p を流すことにより電気抵抗値、ひいてはプローブ温度 T_p が決定できる。 T_p が十分大きければすべてのラジカルが白金線表面で再結合すると期待できる。プラズマ照射を止めた時に、抵抗が変わらないように I_p によるジュール加熱を増大させることができれば、プラズマ(ラジカルを含む)の熱流束が、プラズマあるなしでの I_p 値からのみで決定できる。現在、そのための校正実験を進めている。

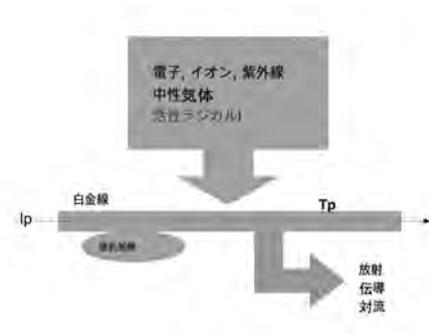


図2 白金触媒プローブの原理

4. まとめと今後の課題

プラズマ源の設計により、プラズマ照射で生成されるラジカル量が大幅に変化し、未だに最適化はされていない。分光法と触媒プローブ法を併用してラジカル量をモニターし、フォルボールエステルやその他の有毒化合物処理のためのプラズマ源の改良を進めたい。

5. 成果報告

[口頭発表リスト]

H.Matsuura, Y.Onishi, S.Kongmany, M.Furuta, K.Imamura, Y.Maeda, S.Okuda, “The Effect of Active Radical Production on the Plasma Degradation of Phorbol Esters in Bio-diesel Fuel Industry”, 5th International Conference on Plasma Medicine, 2014年5月19日, 奈良, (ポスター)

コンメイサンティ、陳健、松浦寛人、古田雅一、奥田修一、今村清、前田泰昭, “大気圧プラズマ処理されたメタノール溶液中のフォルボール 12-ミリスレート 13-アセテートの分解生成物”, 電気学会プラズマ研究会, 2014年9月8日, 堺

H.Matsuura, Y.Onishi, S.Kongmany, S.Okuda, “Radical production around gas-liquid boundary irradiated by the atmospheric pressure discharge plasma”, 14th International Conference on Plasma Surface Engineering, 2014年9月16日, Garmisch-Partenkirchen(Germany)

H.Matsuura and J.Chen, “Size optimization of Pt catalytic probe for atmospheric pressure discharge plasma”, 36th Dry Process Symposium, 2014年11月28日, 横浜, (ポスター)

[論文発表リスト]

H.Matsuura, Y.Onishi, S.Kongmany, M.Furuta, K.Imamura, Y.Maeda, S.Okuda, “Effect of Active Radical Production on the Plasma Degradation of Phorbol Esters in the Biodiesel Fuel Industry”, Plasma Medicine, DOI: 10.1615/PlasmaMed.2014011904, (印刷中)

細胞機能を制御するための 新奇修飾アンチセンス核酸の開発研究

萩原正規¹, 森井 孝²

¹ 弘前大学大学院理工学研究科

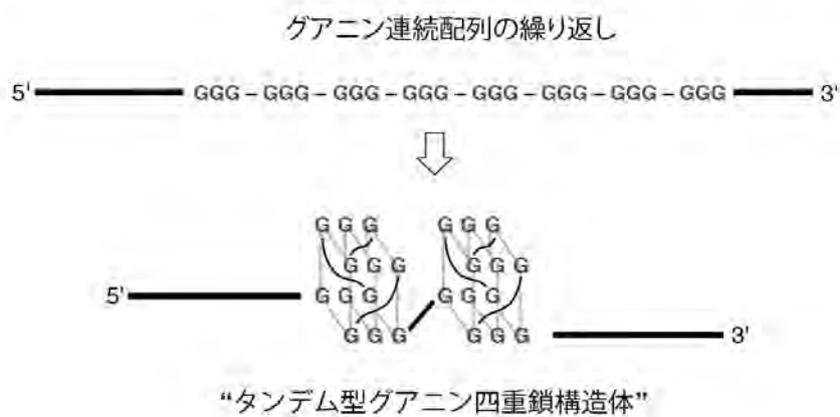
² 京都大学エネルギー理工学研究所

グアニン塩基に富む核酸は、グアニン塩基間の特異的な Hoogsteen 型水素結合を介して特徴的な四重鎖構造を形成することが知られている。ヒト染色体末端には、一本鎖のヒトテロメア繰り返し DNA 配列 (5'-(TTAGGG)_n-3') が存在しており、テロメア繰り返し配列が形成する四重鎖構造が、染色体の安定性など生物学的に重要な機能を果たすと考えられている。さらに近年、遺伝子上流のプロモーター領域において形成される四重鎖構造が、遺伝子の転写過程に重要な役割を有することも明らかとなった。

グアニン塩基に富む RNA についても、DNA 同様にグアニン四重鎖構造を形成することが知られている。ゲノムから転写された mRNA 配列中に存在するグアニン塩基に富む領域は安定なグアニン四重鎖構造を形成し、リボソームによるタンパク質への翻訳過程を阻害することが近年明らかにされ、グアニン四重鎖構造は遺伝子発現等に重要な役割を果たすことが理解されつつある。

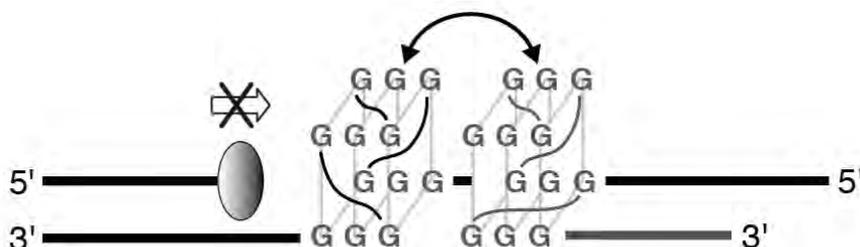
これまでの研究で、連続するグアニン塩基を、RNA に相補的なアンチセンスの 5' 末端部に導入したグアニン修飾アンチセンス核酸 (g-AS) は、RNA と配列特異的な二本鎖形成と同時に、RNA 中に存在する連続するグアニン塩基とともに、安定な高次構造を形成することを逆転写酵素を用いた酵素化学的方法 (RTase ストップアッセイ法) により明らかにした。さらに、UV スペクトル解析、円偏光二色性スペクトル解析により、g-AS が誘起する高次構造は、RNA と DNA のグアニン塩基から形成される RNA-DNA ヘテロ四重鎖構造であることを明らかにした。

グアニン塩基に富む一本鎖の DNA あるいは RNA は、形成された四重鎖構造間同士が相互作用により安定化された、タンデム型四重鎖構造を形成する。RNA 中に形成されたタンデム型四重鎖構造は、極めて低濃度の KCl (0.5 mM) 存在条件下でも安定な構造体を形成し、高い効率で逆転写酵素による逆転写過程を阻害することがわかった (図 1)。



(図 1) 連続するグアニン連続配列が形成するタンデム型グアニン四重鎖構造

本研究では、予めグアニン四重鎖を形成するように設計した配列を、アンチセンス核酸の末端部に導入した新たなアンチセンス核酸を作製し、タンデム型グアニン四重鎖構造体を人工的に模倣した RNA-DNA ヘテロタンデム型四重鎖構造体を設計し（図 2）RNA 中へのタンデム型グアニン四重鎖構造形成能、および、タンデム型四重鎖構造形成が遺伝子発現に及ぼす影響を解析した。



（図 2）グアニン四重鎖就職アンチセンスによる RNA-DNA ヘテロタンデム型四重鎖構造の誘起

アンチセンスに導入したグアニン四重鎖構造の安定性に応じて、RNA 中に形成されるタンデム型四重鎖構造の安定性が変化することを明らかにした。また、アンチセンス領域を欠損させたグアニン四重鎖構造体のみでは安定なタンデム型グアニン四重鎖構造体形成は認められず、アンチセンス領域による 2 重鎖構造形成が、安定な RNA-DNA ヘテロタンデム型四重鎖構造体形成に必要不可欠であることを明らかにした。

次に、グアニン修飾アンチセンス核酸により RNA からタンパク質への翻訳量を制御できるかどうかを検討した。NRAS 遺伝子の 5'-UTR の 10 塩基の領域に相補的なアンチセンス核酸 (AS) を設計し、遺伝子翻訳に対する影響を検討したが、5 μ M のアンチセンス核酸を導入しても遺伝子発現に対する影響は認められなかった。一方、AS の 5'末端領域に連続するグアニン配列を導入し、NRAS のグアニン塩基に富む領域と四重鎖構造を形成するように設計したグアニン修飾アンチセンス核酸 (G-AS) では 1 μ M でほぼ完全に翻訳が抑制されることが分かった。さらに、タンデム型グアニン四重鎖構造体を形成するように設計したアンチセンス核酸ではさらに 1/10 濃度 ($K_i=8.7$ nM) で翻訳過程を抑制できることがわかった。

本結果より、グアニン四重鎖構造体修飾アンチセンス核酸は RNA 構造中に安定なタンデム型四重鎖構造を誘起することにより、逆転写の過程を阻害するだけでなく、非翻訳領域にもグアニン四重鎖構造を誘起することによりタンパク質への翻訳過程も阻害できることを明らかにした。今後、生物学的な安定性を向上させるために、有効な化学修飾法を開発することにより効率的にタンパク質翻訳過程を制御可能な修飾アンチセンス核酸の開発を行いたい。

参考文献

1. Masaki Hagihara, Keisuke Yoneda, Hiroaki Yabuuchi, Yasushi Okuno, Kazuhiko Nakatani
Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 20, 2350–2353 (2010)
2. Masaki Hagihara, Lisa Yamauchi, Akiko Seo, Keisuke Yoneda, Mayo Senda, Kazuhiko Nakatani
Journal of the American Chemical Society, 132, 11171–11178 (2010)

[口頭発表リスト]

Masaki Hagihara, and Takashi Morii,

The 5th International Symposium of Advanced Energy Science ~ Contribution to Zero-Emission Energy ~
2014 年 9 月 30 日-10 月 2 日、京都大学、ポスター

ゼロエミッションエネルギーの社会的受容性を適切に調査するための討論型世論調査手法の構築と科学教育

岩切宏友¹, 村吉範彦¹, 森下和功², 中筋俊樹²

¹ 琉球大学教育学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

エネルギー・地球温暖化問題は持続可能な社会を実現するための重要テーマの一つであり、この解決の鍵となるのがゼロエミッションエネルギーである。ゼロエミッションエネルギーには原子力発電と各種の自然エネルギーがあり、後者は概ね好意的に受け止められているが、基幹エネルギーとして期待されていた原子力発電は国民からの信頼が大きく揺らいでいる状況にある。今後のエネルギーの選択については全国的な議論が必要となり、討論型世論調査法などの意思決定システムの構築が必要なり、同時に長期的展望に基づいたエネルギー環境教育も重要となる。本研究では施設見学に工夫を加え、エネルギー環境教育に関する効率のよい学習プログラムの開発を目的とした。

本研究で対象とした沖縄やんばる海水揚水発電所は、世界初の海水揚水発電所であり、見学用施設としても一般公開されている。一般的な揚水発電所と異なり、海を下池、人工の上部調整池を上池として利用するため、下池の築造が不要である。このため、揚水発電地点の適地選択肢を拡大する技術として期待が寄せられている。水圧管路、水車、発電機はすべて地下に設置されており、最大使用水量は 26 m³/s で有効落差は 136 メートルである。本施設見学の前後や見学中に施設側からの情報に併せて解説した学習項目は、①音速と音波の反射（やまびこ）、②3相交流発電・送電、③絶縁体としての碍子（がいし）の働き、④海水による金属の腐食とステンレス鋼の組成、⑤電力の出力調整と夜間電力、⑥水の位置エネルギーと電気エネルギーの変換とその変換効率、⑦流体シミュレーション、⑧材料強度試験（プラスチック・ゴムが中心）、の8項目を中心とした。項目①については“発電”とは直接的な関係がない基礎的な物理現象ではあるが、施設見学の際に容易に実体験が可能であることからプログラムに加えた。項目②-⑧は当該発電所と関連した科学・技術的事例と結びつけることが可能な学習項目であり、比較的身近でエネルギー・環境教育と関連の深いものを選択した。なお、項目番号は次節以降でも引用する。

2. 教育プログラムの内容

本教育プログラムの概要を以下に示す。まず、施設の入り口付近で6万6000ボルトの高圧線を支える鉄塔についての説明を行う。鉄塔は3本の太い電線が3つの巨大碍子で支えられており送電線が3本であることが明確に認識できる。ここで3相交流発電についての概説も行う（関連事項：項目②・③）。次にレクチャールームで講習を受け、その後、標高132mの地上施設から地下発電所（標高-15m）までエレベータで移動する。地下発電所の入り口付近には発電所搬入立坑が残っており、現在は資材を運ぶためのクレーン穴として利用されている。この立坑の高さは約150mであり、真下には機材の周辺に10人程度が入れるスペースがある。ここから音を出すと1秒程度で反射音が聞こえる（関連事項：項目①）。沖縄県には適当な山地がないため、このような「やまびこ」を明確に体験できる場所は限られており、貴重な実体験場所といえる。

地下発電所には揚水発電の要であるポンプ水車発電電動機があり、駆動状況を観察することができる。ポンプ水車のランナーおよびガイドベーン（ランナーへの水量を調節する羽根）はモリブデンを数%添加したオーステナイト系ステンレスを用いており、海水に対する耐食性を保持している。なお、

本施設見学前には、海岸付近の腐食したステンレス材料（土木機械など）を観察させ、塩分があるとステンレスの不動態皮膜（クロム酸化物）が局所的に破壊され、虫食い状の腐食が生ずることを説明しておく（関連事項：項目④）。

地下発電所から放水口連絡トンネルを通ると、900個のテトラポットに囲まれた放水口があり、海水が放水されている様子がよくわかる。放水口は放出された海水が周囲の環境（サンゴ礁など）に負荷を与えないように流体解析を行った後に建設されている。この流体解析はナビエ・ストークス方程式に基づいたコンピュータシミュレーションであり、天気予報の気象モデル作成も本質的には同等の手法が用いられていることを簡単に説明する（関連事項：項目⑦）。

最後に地上に戻り、上部調整池の見学を行う。上部調整池は高さ25m、幅252mの八角形であり、有効貯水量は564,000 m³である。上部調整池とポンプ水車発電電動機との有効落差は136mであることから、このとき水が有している位置エネルギーと発電効率などが計算できる（関連事項：項目⑥）。なお、遮水シートとして用いられているEPDMゴムシートは厚さが2.0mmにもかかわらず、981 N/cm²の引っ張り強度を有し、最大伸び率は450%であることから、材料強度試験の基礎について解説する（関連事項：項目⑧）。

3. 事後アンケートによる知識定着度調査

本実習に参加した学生（R大学教育学部学生）を対象として、ほぼ1年後に知識の定着を調べるためのアンケート調査を実施した。対照群として実習未参加の同じ大学・学部の結果も併せて示す。表1に示すように、本アンケートは知識と経験を問う内容となっている。各問題における正答率を表2に示す。問1の電線による送電方式や問4の材料強度試験法、問6の電気エネルギーを水の位置エネルギーに変換する方法については実習参加者の正答率が未参加者の正答率を著しく上回る結果が得られた。また、問3の碇子や、問5の「やまびこ」についての知識を問うアンケートについても参加者の知識が未参加者の知識を大きく上回った。一方、問2については、実習参加者の正答率もあまり高くはならず、実習の効果を確認することができなかった。これは塩分による孔食現象を一人一人が十分に観察する時間をとれなかったことと、参加者に金属学の学習経験がほとんどないことが原因と推測される。金属学は典型的な身近な科学といえるので、今後の学習プログラム作成における重要課題と考えている。

表1 事後アンケートの設問一覧

問1	送電方式についての質問です。送電線の本数と送電方式について答えなさい。 ①1本で直流 ②2本で直流 ③3本で直流 ④1本で交流 ⑤2本で交流 ⑥3本で交流 ⑦わからない
問2	ステンレス鋼は塩害により腐食しやすくなります。どのような腐食が起こるのかを説明しなさい。
問3	「碇子（ガイシ）」を見たことはありますか。見たことがある人は、その用途を説明しなさい。
問4	プラスチックやゴムの強度をテストするための一般的な方法について、答えなさい。 ①細い針でつつく ②引っ張る ③加熱と冷却を繰り返す ④特殊な棒でたたく ⑤ わからない
問5	「やまびこ」を直接体験したことがありますか？もしあれば、どこで体験したのかを記述してください。
問6	揚水発電所は、電気エネルギーを水の位置エネルギーに変換します。このときの方法について記述しなさい。

表2 事後アンケートの設問に対する正答率

	問1	問2	問3	問4	問5	問6
実習参加者（15名）	67%	27%	60%	73%	100%	80%
未参加者（18名）	11%	11%	0%	11%	27%	11%

[論文発表リスト]

岩切宏友（琉大）、森下和功（京大）、村吉範彦（琉大）、中筋俊樹（京大）、「沖縄やんばる海水揚水発電所を活かしたエネルギー環境教育」、エネルギー環境教育研究 Vol.9 No.1 (2014) P 51-54

細胞内エネルギー代謝シグナルの可視化を目指した 蛍光プローブ開発

佐藤慎一¹，渡邊瑞貴¹，勝田陽介¹，中田栄司²，田村友樹²，森井 孝²

¹京都大学物質-細胞統合システム拠点

²京都大学エネルギー理工学研究所

【研究背景と目的】

近年、RNA があらゆる生命現象に関与していることが明らかとなっており、RNA を研究することは、生命現象の全貌を明らかにする上で極めて重要な課題として位置付けられている。細胞内の RNA の動きを見ること、すなわち RNA の時空間的な細胞内挙動を視覚的に捉えることは、RNA の細胞内での働きを理解するための重要な知見を得ることにつながる。しかしながら、内在性 RNA をライブイメージングするためのツールに乏しいなど技術面の難しさから、細胞内における RNA の動的・空間的な制御機構の大部分は未だ謎に包まれているのが現状である。本研究では、培養液に添加するだけで mRNA の生細胞内動態を観察可能な蛍光化合物プローブとそれを認識する RNA アプタマーを利用した RNA イメージング法の開発を目指す。

これまでに申請者は、種々の蛍光波長で標的 RNA を検出可能な小分子蛍光プローブの開発を行ってきた [Chem. Commun., 47(16), 4712-4714, (2011)]。このアプローチでは、まず、蛍光クエンチャーBHQ1 分子に親和性を有する RNA アプタマーを選出する。この RNA アプタマーは、BHQ1 により消光されている「蛍光基-BHQ1 プローブ」の BHQ1 部分に結合し、BHQ1 のクエンチャーとしての機能を無効化することで、プローブの蛍光を回復させる。BHQ1 は幅広い波長領域の蛍光を消光する性質を持つため、様々な「色」の蛍光で標的 RNA アプタマーを検出することが可能となった(図 1)。本研究では、BHQ1 認識 RNA アプタマーに配列認識能を付加することで、内在性 RNA 検出が可能な方法論への改良を目指した。

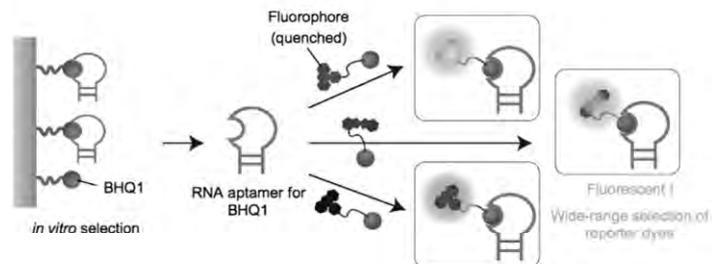


図 1. 蛍光化合物プローブと RNA アプタマーを利用した RNA イメージング法

【方法と実験結果】

: RNA アプタマーの最適化 :

BHQ1 認識 RNA アプタマーは、BHQ1 認識ループとそのループ構造を安定化するステム構造からなる。この RNA アプタマーはステム構造を短くすると、BHQ1 認識ループが不安定化し、BHQ1 の結合能が失われる。この性質を利用して、ステム構造を RNA 認識アームに置きかえることで、標的 RNA 存在下でのみ BHQ1 認識ループが安定化し、BHQ1 を捕えることができるように RNA アプタマーユニ

ットを設計した。

このモデルを検証するため、設計した RNA 認識アームを持つ RNA アプタマーと BHQ1 プローブの混合液に、25 塩基からなる標的 RNA を加えることにより、BHQ1 プローブの蛍光強度変化を評価した。BHQ1 プローブ単独の蛍光（図 2 - 黒×）と RNA アプタマー存在下での BHQ1 プローブの蛍光（図 2 - 青○）の強度に変化はなく、RNA アプタマーが BHQ1 プローブを捕える性質を失っていると考えられた。しかしながら、**標的 RNA 存在下では BHQ1 プローブの蛍光が回復し、BHQ1 プローブ単独の蛍光と比較して約 5 倍の強度の蛍光が観察された**（図 2 - 赤○）。この結果は、RNA 認識アプタマーが標的 RNA を配列選択的に認識して、標的 RNA 上で安定な BHQ1 認識ループ構造を形成し、BHQ1 プローブを捕える性質が回復したことを示唆する。本実験により、任意の RNA 配列に対して蛍光ラベルする方法論の土台が確立できたと考えられる。利用した RNA アプタマー・標的 RNA は DNA テンプレートから転写することにより調整しており、共同利用機器 DNA シーケンサーによりその配列を確認した。

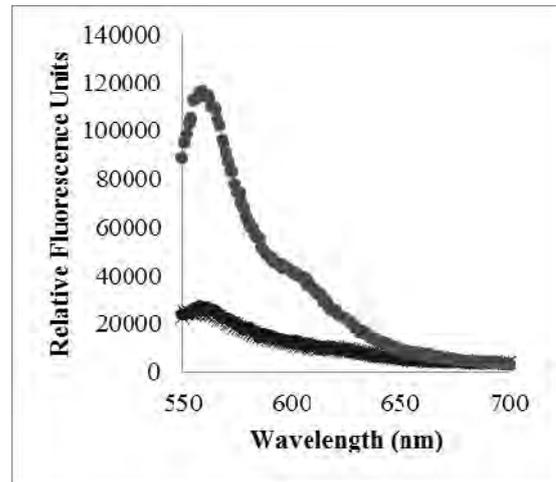


図 2. 標的 RNA の配列選択的ラベル化

: RNA アプタマー発現ベクターライブラリー作製と利用 :

本研究の RNA アプタマーユニットはその設計の簡便さと生細胞内に直接発現できることが最大の利点である。この利点を生かし、84 種の細胞骨格タンパク質 mRNA に対して RNA アプタマーユニットを設計し、その mRNA の細胞内動体の観察を行った。作製した RNA アプタマー発現ベクターは、共同利用機器 DNA シーケンサーによりその配列を確認した。得られた RNA アプタマー発現プラスミドを細胞に導入、膜透過性 BHQ1 プローブで処理することで、これまでに観察例の無い mRNA 種についてその動体の観察に成功した。上記の結果は、発表リストに記載する学术论文に投稿し、掲載されることとなった。

【本年度 発表リスト】

[論文発表リスト]

Sato S., Watanabe M., Katsuda Y., Murata A., Wang D.O., Uesugi M., Live-Cell Imaging of Endogenous mRNAs with a Small Molecule, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **in press**

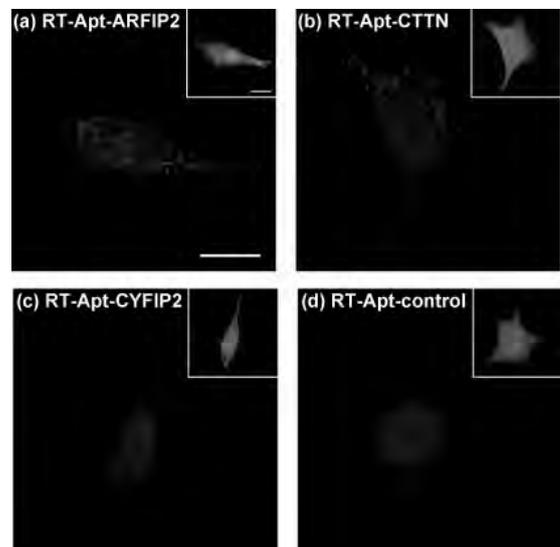


図 3. 観察に成功した細胞骨格タンパク質

SMBI のためのノズルからの流れの解析

西野信博¹, 村上 徹¹, 小森雅人¹, 水内 亨², 岡田浩之², 小林進二², 大島慎介²

¹ 広島大学大学院工学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究の背景と目的

核融合実験装置のプラズマへの高効率な作動ガス供給は、プラズマ分布制御による性能の向上・維持にとって、極めて重要な役割を担っている。ヘリカル軸ヘリオトロン型高温プラズマ実験装置 Heliotron J においては、ラバールノズルに似た形状のノズルを使用して燃料ガスを超音速分子ビーム状にして入射する SMBI (Supersonic Molecular Beam Injection) を適用し、通常的气体パフとの比較を検証中である。さらに、ガスパフで多量にガスを入れる HIGP (High Intense Gas Puff) との比較も行われつつある。今までの調査で、SMBI は通常的气体パフに比べて 50% 以上の燃料供給効率の向上が期待できることが解ってきた。また、この効率は分子ビームの速度や拡がり方に依存する可能性が高い。このため、HIGP を含め、プラズマへの燃料供給の効率を上げるためのガスの入射条件を知ることが急務となっている。

本研究では、SMBI ノズル内の比較的圧力の高いガスの流れのみならず、ノズルから出たガスの流れを極低圧力気体中で計算することにより、実際に近い条件でガスがプラズマと接する状況のシミュレーションを実現する。また、計算結果と模擬真空容器へのガス入射実験との比較などと合わせて、計算結果の検証を行う。

2. 本年度の進捗状況と支配方程式など

昨年まで 3 次元化に向けていろいろな試みをしてきたが、基本的な問題であるメモリの制限を取り除くには、新たな計算環境が必要と判断し、本年度に新たな PC を購入し、メモリなどの増設、OS とコンパイラーの変更など大幅に計算環境を変えた。

現在のスペックの概要を表 1 に記す。

ソフトでは、OS を Linux の CentOS6.5(64bit)、コンパイラーに Intel の Fortran Compiler を用いることにより、ソフト的なメモリ制限をなくすことができた。但し、昨年まで使用してきた JAVA のプログラムは使用できないので、本年度は Fortran に変更し、さらに、昨年報告した CIP 法を導入している。また、当研究室で研究中の境界条件 CPT 法を併用する予定である。

支配方程式は、昨年と同様に 3 次元のオイラー方程式で流体の粘性項は入れていない。粘性が利いてくる領域ではないと判断しているが、最終的には、粘性項を入れる事も視野に入れている。また、プラズマ表面でのガス分子とプラズマ粒子（主に、電子と水素イオン）との衝突による電離、荷電交換の効果を局所平衡モデルで導入することも考えている。局所平衡モデルは、ペレット入射などの固体からプラズマへの昇華には物理描像に困難を伴うが、ガスとプラズマとの相互作用においては緩和時間が大きいと予想されるので、有効ではないかと考えている。

3 次元の支配方程式を以下に記す。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} = 0 \quad \text{質量保存の式}$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \times (\nabla \times \mathbf{v}) + \frac{1}{2} \nabla q^2 \right) = \rho \mathbf{F} - \nabla p \quad \text{運動量保存の式}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla p = -\gamma p \nabla \cdot \mathbf{v} \quad \text{圧力の移流方程式 (エネルギー保存の式の変形)}$$

但し、 ρ, p は流体の密度と圧力、 \mathbf{v} は速度で、 \mathbf{F} は外力で、通常は 0 である。また、 γ は比熱比である。

3. 試験結果

Fortran で作成した 3 次元プログラムを、一次元衝撃波管の初期値で計算して、バグの有無の判断をした。図 1 はその一例である。

図から判断して、CIP 法による衝撃波の捕獲はそれほど悪い結果ではないことが分かった。3 次元すべての方向で問題なければ、凡そプログラムは完成していると予想される。

今後、さらにプログラムのチェックを行いながら、来年度には 3 次元ノズル形状での超音速流の計算を行う予定である。

4. 本年度 発表リストについて

本年度は、計算環境の変更が主で、学会発表などはない。

参考文献

CIP 法に関しては、例えば、T.Yabe and T.Aoki, "A Universal Solver for Hyperbolic Equations by Cubic-Polynomial Interpolation. I. One-Dimensional Solver", *Comput. Phys. Commun.*, **66**, 219 (1991).
 数値計算技法は、W.H.Press, *et al.*, "Numerical Recipes in C" Cambridge University Press
 棚橋隆彦, "CFD 数値流体力学" アイピーシー出版

表 1 本年度の計算環境

CPU	Intel	Corei7 4770K
Motherboard	Asrock	Z97
Memory	DDR3	16GB
SSD	Samsung	250GB

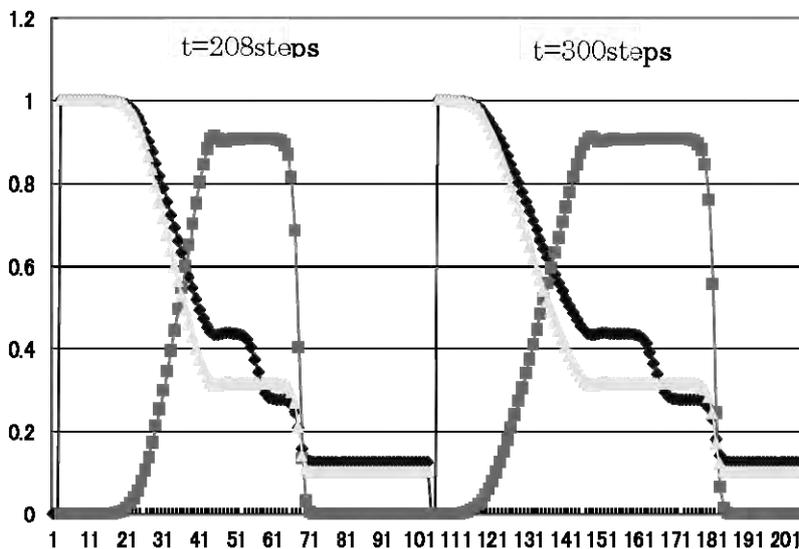


図 1 CIP 法の試験結果

初期値は 1 次元の衝撃波管で、長さ方向 100 格子、50 番目が高圧と低圧の境である。図は、左右に二つの時刻の計算結果を示している。図中、密度(黄)、圧力(青)、速度(ピンク)を示す。

ゼロエミッションエネルギーを指向した 中性子捕捉型抗腫瘍剤の開発

宇都義浩¹, 多田 竜¹, 芝 一休¹, 中田栄司², 森井 孝², 増田 開²

¹徳島大学大学院 STS 研究部ライフサイエンス部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

本研究「ゼロエミッションエネルギーを指向した中性子捕捉型抗腫瘍剤の開発」の目的は、ゼロエミッションエネルギーである中性子源を利用し、中性子照射により発生する物理的なエネルギーと薬剤本来の化学的エネルギーによる治療が可能な中性子捕捉剤を設計開発することである。ホウ素の持つ中性子捕捉能を利用した治療法として癌細胞を標的としたホウ素中性子捕捉療法(BNCT)が知られているが、既存のBNCT薬剤は癌組織に到達することを目的とするため薬剤骨格自体に薬理活性を持たない。しかし我々の考える中性子捕捉剤は、医薬品に天然ホウ素を導入することで従来の薬理活性を持ちつつ、標的分子破壊と分子追跡が可能な次世代型医薬品である。本年度の分子設計・合成した中性子捕捉剤は、がん分子標的剤であるポリ(ADP-リボース)ポリメラーゼ(PARP)の酵素阻害剤Veliparibをリードとした、オルト、メタ、パラアミノカルボニルベンゾイミダゾイルフェニルボロン酸である(図1)。本年度は貴研究所の小型中性子源で中性子照射し、これらの中性子捕捉剤をターゲット分子であるPARPに対する酵素阻害活性を指標とする中性子増感活性評価を実施した。

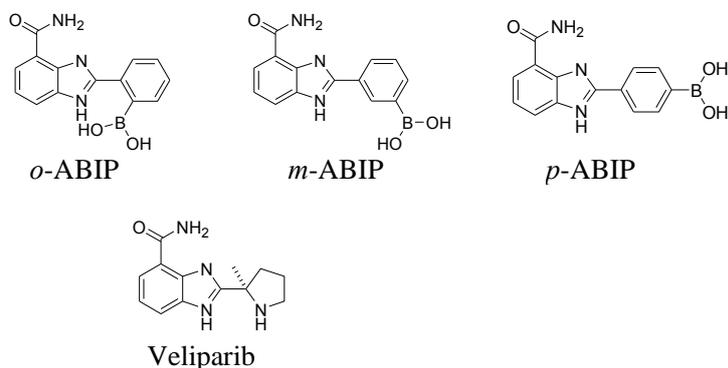


図1 *o,m,p*-ABIP 及び Veliparib

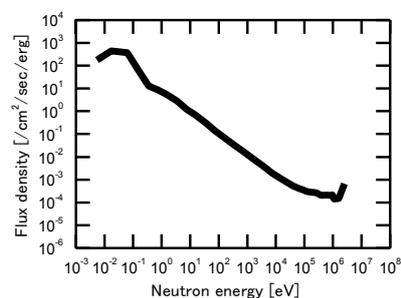


図2 サンプル位置における中性子のエネルギースペクトル

2. 実験方法

中性子捕捉剤の分子設計・合成: 2,3-diaminobenzamide と相当する formylphenylboronic acid をメタノール中室温で縮合反応させ、目的とするボロン酸を得た。

PARP 阻害活性評価: HT Universal Colorimetric PARP Assay kit with Histon-Coated strip wells (TREVIGEN)を用いて *o,m,p*-ABIP の PARP 阻害活性を評価した。

中性子増感活性評価: 核融合型小型中性子発生装置(京都大学エネルギー理工学研究所 増田開先生所有)を用いて、*o,m,p*-ABIP 及び Veliparib の中性子併用時の阻害活性を評価した。この中性子源は、DD 核融合反応により定常的に 2.45 MeV 単色の中性子を発生する直径 25cm の球形真空容器と、この周囲を覆う球殻状の冷却水層(厚さ: 照射方向(下方)は 7 mm、他の方向は 47 mm)からなる。冷却水は中性子の減速材を兼ねている。中性子源の真下の床面に鉛ブロック、その上にサンプルを配置し、中性子源中心とサンプルとの距離は約 35cm とし、10 分間連続で中性子線を照射した。

3. 結果及び考察

o,m,p-ABIP の PARP 阻害活性は *o*-ABIP は $IC_{50}=37.3 \mu\text{M}$ 、*m*-ABIP は $IC_{50}<1 \mu\text{M}$ ($1 \mu\text{M}$ で阻害率 58%)、*p*-ABIP は $IC_{50}=2.79 \mu\text{M}$ であった。放電型核融合中性子源を用いた中性子照射の結果、*o*-ABIP 及び *m*-ABIP において中性子線の併用により PARP 阻害率の増強が確認された (表 1)。なお、*p*-ABIP および Veliparib は未照射時の阻害活性が高いため中性子照射による PARP 阻害率の増強は確認されなかった。これらの結果を踏まえ、*m*-ABIP の中性子併用時の抗腫瘍活性についてヒト乳がん細胞 MCF-7 および T-47D を用いて WST-1 アッセイより評価した。その結果、中性子による抗腫瘍活性の増強は確認されなかった (表 2)。

表 1 *o,m,p*-ABIP 及び Veliparib の中性子の有無による PARP 阻害率

	PARP のみ	<i>o</i> -ABIP	<i>m</i> -ABIP	<i>p</i> -ABIP	Veliparib
未照射	0%	93.3%	67.4%	72.4%	97.8%
照射(10 min)	9%	100%	100%	94.7%	100%

表 2 MCF-7 もしくは T-47D 細胞に対する *m*-ABIP の中性子併用による抗腫瘍活性

MCF-7	Control	<i>m</i> -ABIP	T-47D	Control	<i>m</i> -ABIP
未照射	1.00±0.023	0.843±0.060	未照射	1.00±0.088	0.805±0.034
照射 (60 min)	1.00±0.053	0.852±0.023	照射 (60 min)	1.00±0.041	0.919±0.065

4. 結論

本研究においてボロン酸修飾による水溶性の向上に起因した細胞内取込量の減少に由来すると示唆される。そこで我々はボロン酸の部位を *N*-methyliminodiacetic acid で保護した化合物 1～3 (図 3) を新たに分子設計し、現在合成中である。これらの化合物は近日中に中性子増感活性評価を行う予定であり、PARP 阻害活性及び中性子増感活性について報告会で発表する予定である。

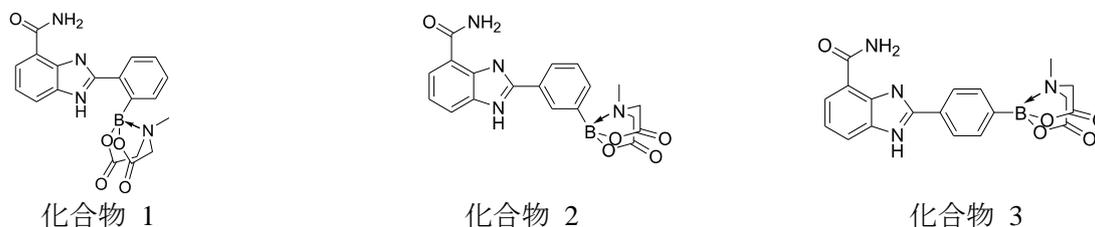


図 3 新たに分子設計した PARP 阻害型中性子捕捉剤

[口頭発表リスト]

多田 竜, 堀 均, 宇都義浩, “中性子捕捉特性に着目したホウ素含有医薬品の開発”, 創薬懇話会 2014, 7月 10-11 日, 岐阜市, (ポスター)

[論文発表リスト]

H. Hori, R. Tada, Y. Uto, E. Nakata, T. Morii, K. Masuda, “A neutron dynamic therapy with a boron tracedrug UTX-51 using a compact neutron generator”, *Anticancer Research*, 34(8), 4557-60, 2014 (8月), (発行済)

複数の数値シミュレーションによる 三次元プラズマ中の高エネルギー粒子輸送解析

中嶋洋輔¹, 小林進二², 吉川正志¹, 小波蔵純子¹, 武田寿人¹, 市村和也¹,
岩元美樹¹, 細田甚成¹, 清水啓太¹, 村上定義³, 水内 亨², 岡田浩之², 原田伴誉⁴,
大谷芳明⁴, 桐本充晃⁴, 呂 湘浚⁴, 安枝樹生⁴

¹筑波大学プラズマ研究センター

²京都大学エネルギー理工学研究所

³京都大学大学院工学研究科

⁴京都大学エネルギー科学研究科

1. 本研究の目的

磁場閉じ込め型の核融合炉において、核融合生成物である α 粒子や中性粒子ビーム等のプラズマ加熱で生成される高エネルギー粒子は、その閉じ込め特性が加熱効率(粒子・熱・運動量)・第一壁損耗に直接影響するため非常に重要な研究対象である。特に三次元磁場配位を持つ高温プラズマでは、その磁力線構造に起因した高エネルギー粒子の損失が予測されること、および高エネルギー粒子の輸送に影響を与える中性粒子は幾何学形状が複雑であることから、輸送を高精度で評価することが難しい。従来よりこれらの解析のために数値計算コード群が整備されてきているが、必ずしも三次元磁場配位に対応した解析が行われておらず、特に中性粒子輸送解析については、一次元を仮定した数値解析の結果や単純化された解析解の結果が広く用いられており、解析手法の改良が求められている。

本研究課題では三次元プラズマ中の高エネルギー粒子の輸送を解析するために、三次元磁場配位に対応した複数のシミュレーションコードの整備・解析手順の改良を進めてきた。今年度はコード群をヘリオトロンJプラズマの中性粒子ビーム入射(NBI)吸収分布解析に適用し、特に、高密度放電における密度分布形状の違いがNBI高速イオン分布にどのように影響を与えるか解析を行った。

2. 方法・結果

対象とした放電の電子密度・電子温度・イオン温度の分布を図1(a)、1(b)に示す。本放電では高強度短パルスガスバフ(HIGP)の制御方法の違いにより、密度がホローもしくはピークな分布形状をもつ放電が得られている(以下ホロー分布、ピーク分布とする)。ピーク分布の場合には中心部で $1.3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の、ホロー分布の場合には、 $r/a=0.6$ で $0.9 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ の高密度プラズマ生成に成功している。なおヘリオトロンJには接線NBIが2機(BL1, BL2)設置されており、本放電ではバランス入射で入射パワーはトータルで1.3MW(ホロー分布の場合)、1MW(ピーク分布の場合)である。

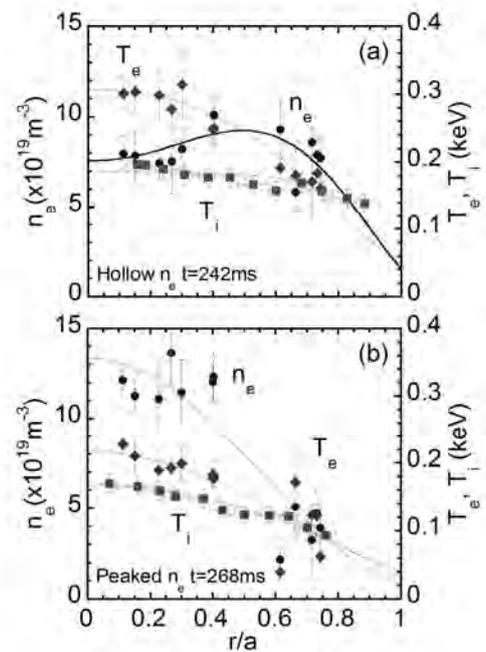


図1 HIGP法を用いた高密度放電における(a)ホロー分布の場合、および(b)ピーク分布の場合の電子密度、電子温度、イオン温度の径方向分布。

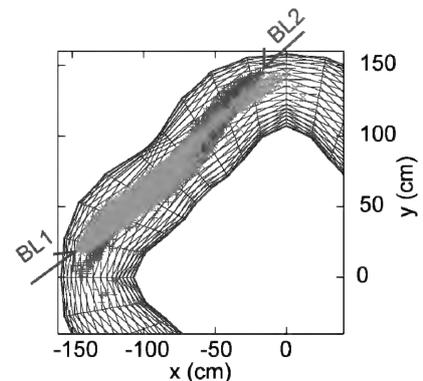


図2 ピーク分布の場合のビームイオン発生位置分布。

これらのプラズマを対象に、まず中性粒子ビームによる高エネルギーイオン発生位置解析 (HFREYA)を行った。HFREYA ではモンテカルロ法を用いて、NBI による中性粒子ビームのビームイオン発生位置を計算することができる。図 2 にピーク分布の場合のビームイオン発生位置の分布を示す。NBI の加速電圧は BL1, BL2 ともそれぞれ 25kV, 27kV である。密度が高いため入射された中性粒子ビームは対向面と衝突する前にほとんどがイオン化されており、シャインスルー率は 15%以下であった。

ホロー及びピーク分布の場合の発生イオン密度の径方向分布を図 3(a), 3(b)に示す。ビームは r/a が正のプラズマ周辺部より入射される。ホロー分布の場合には r/a 正の領域における周辺部($r/a > 0.7$)で発生イオン密度が高いことがわかる。反対にピーク分布の場合には中心での発生イオン密度が高く、密度分布を反映している。 $r/a < 0$ の領域では、ピーク分布の場合に発生イオン密度が若干高い。

このビームイオンの発生位置をもとに高速イオンの軌道を計算し、初期に損失するイオンおよびイオンの軌道を考慮した高速イオン分布を評価した。なおこの解析では衝突の効果は含まれていない。図 4 に Full energy 成分のビームイオンを対象として、それぞれの電子密度分布の場合の高速イオン密度分布を示す。ピーク分布の場合には中心部での高速イオン密度が高いが、周辺部において両者の差が小さい。今回の計算では $r/a=1$ の再外殻磁気面外側に損失した粒子の再突入効果が考慮されておらず、その影響と考えられる。ホローな密度分布を持つ高密度プラズマのように、周辺部で吸収される NBI が無視できない場合には、再突入粒子の効果を考慮した解析と比較して、本手法の妥当性を検証する必要がある。

3. まとめ

ホローな分布を持つ高密度放電のように、周辺部でのビーム吸収が多い場合、軌道損失の効果を過大評価している可能性が考えられる。現在、共同研究の枠組みの元で再突入粒子を考慮できる解析ツールのヘリオトロン J への適用を進めており、これらの比較・理解が進むと予想される。

4. 成果報告

- [1] 小林進二, 水内 亨, 他, 第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月19日-20日, つくば市, 19-018.
- [2] 小林進二, 水内 亨, 他, Plasma Conference 2014, 2014年11月18日-21日, 新潟市, 19pE-4.

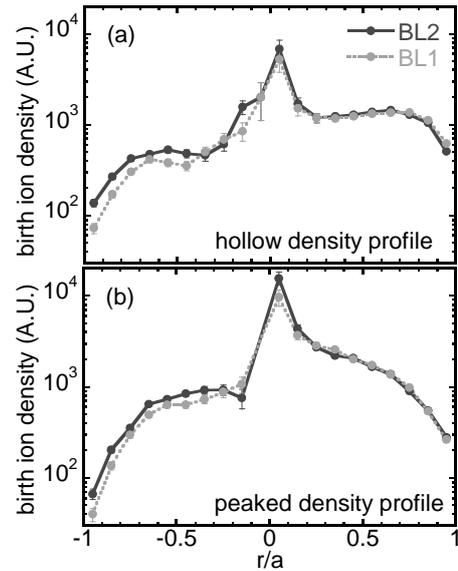


図 3 発生したビームイオン密度の径方向分布。(a)ホロー密度分布、および(b)ピーク密度分布の場合。

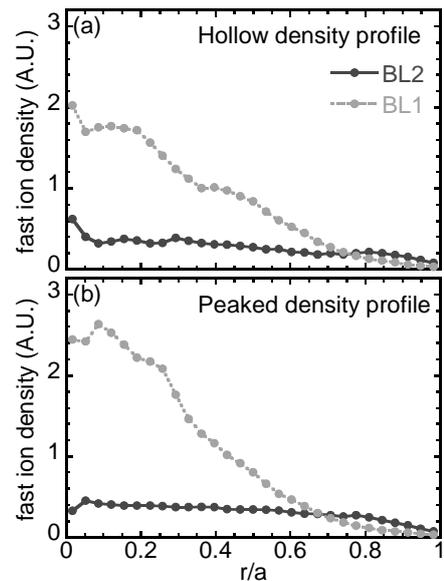


図 4 イオンの軌道効果を考慮した高速イオン密度分布。(a)ホロー密度分布、および(b)ピーク密度分布の場合。

高熱伝導複合材料の開発と組織制御Ⅱ

李 オギョン¹, 崔 龍範², 杉尾健次郎², 佐々木元², 檜木達也³

¹ 広島大学工学研究科

² 広島大学工学研究院

³ 京都大学エネルギー理工学研究所

自動車等の輸送機器から排出される二酸化炭素や大気汚染ガスを減少させるため、ハイブリット車や電気自動車の技術開発が注目されている。これらの技術に関わる研究開発と共にその作動性能を向上させる素材の開発も重要である。特に、自動車等に用いられる電子・電気機器は高集積化、高電力化による発熱が問題となっており、作動性能や寿命に影響を与える原因になっている。本研究ではハイブリットおよび電気自動車の燃費向上を目的に、高電力用電子部品である IGBT(Insulated gate bipolar transistor)の放熱性を高める為の、高熱伝導性放熱材料の開発を目標とした。

放熱材料には、高熱伝導性と軽量性、適度な熱膨張性を合わせ持つ炭素(C)/アルミニウム(Al)複合材料が注目されている。気相成長炭素繊維(VGCF)は、優れた機械的特性、高電気伝導性、高熱伝導性、低熱膨張性を合わせ持つており、複合材料の分散材として優れていると考えられる。この繊維と Al を複合化することにより、優れた放熱板、放電板等に適用可能な放熱材料を作製することが可能である。多孔体炭素プリフォームの作製には気孔性状(孔径・気孔率・気孔の形など)の制御が重要である。スペーサー粒子を金属中に何らかの手法(鋳造や焼結、めっきなど)で配置し、作製過程で除去することにより、そのスペーサー粒子の大きさや形をした空間(気孔)をほぼそのまま金属内に残すスペーサー法(スペースホルダ法、レプリカ法)が適用可能になっている。本研究では、鋳造スペーサー法を応用し、塩化ナトリウム粒子(NaCl)をスペーサーとして、炭素粉末(VGCF+メゾフェーズピッチ(MP))を用い、アルミニウム鋳造用多孔体炭素プリフォームを作製した。低温、低圧の条件で作製を行い、使用エネルギーを減少させながら高熱伝導率の炭素/アルミニウム複合材料を作製することとした。そのため、MP(固定炭素が 84~87%)と VGCF の混合粉末を用い多孔体の開発を目的とし、その作製方法としてはスペーサー材である NaCl の割合を制御し、連続気孔を持つ多孔体の作製することを目指した。

VGCF 単体の SEM 観察の結果、VGCF が凝集していたので、混酸(硝酸+硫酸)中で 333-353 K、2 h、超音波処理を行うことにより、VGCF の表面にカルボキシル基などの官能基が導入され、互いの電気的反発により凝集を抑制させることができた。次に VGCF と MP を 1 : 9 の割合で 3h、エタノール中で、V 型混合器を用いて混合した。エタノールを気化、除去させた炭素混合粉末を NaCl と約 5 : 5 の割合で混合し、10min 間、乾式で攪拌した。これを金型に入れ、25MPa と 75MPa の圧力を加えた。そ

の後、793K の温度、1h、大気中で焼結し、4 日間、蒸留水に入れ、NaCl を除去させた。

25MPa の圧力を加えた後に作製された炭素プリフォームを SEM 観察した結果、大きさ 180~355 μ m の気孔が見られたが、不均一で、炭素が大きく固まっている部分もあった。また、スペーサーの NaCl が炭素粉末と混合する時、触れ合っている部分が連続孔となっている開気孔が見られたが、気孔の形がつぶれている部分が多く観察された。

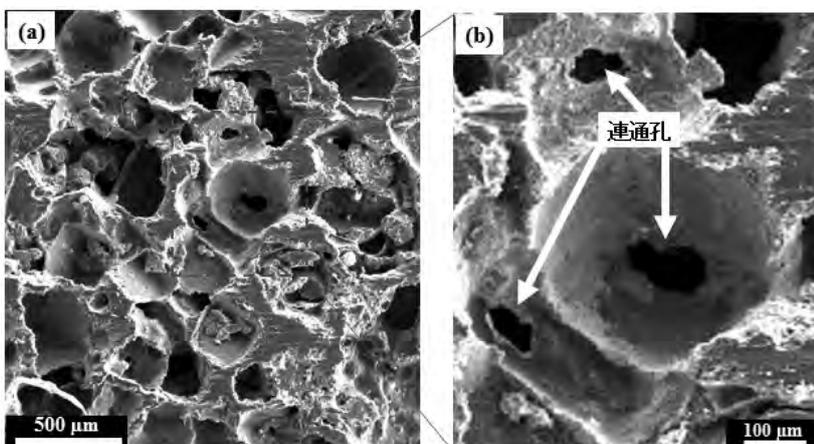


図1 多孔体プリフォームの SEM 観察(25MPa) (a)プリフォームの表面-低倍 (b)プリフォームの表面-高倍

75MPa の圧力を加えた後に作製された炭素プリフォームでは、大きさ $180\sim 355\ \mu\text{m}$ のほぼ均一な形の気孔が観察された。連通孔となっている開気孔も見られた。

25MPa では炭素ブロック構造が緻密ではなく、気孔の形や孔径が均一ではなかったが、75MPa では炭素ブロックが緻密し、気孔の形や孔径も 25MPa のものに比べ、均一化していることが分かる。75MPa の圧力印加により、気孔の形状や配置の制御することができると思われる。

75MPa 印加の焼結の後、VGCF と MP との間に、マイクロサイズの気孔が存在していることが観察された。しかし、バインダー層である MP は VGCF 同士を架橋していることが確認された。

25MPa 印加の場合、気孔率 44.85vol.% のプリフォームが作製できた。NaCl は最初に添加した 36.3vol.% に比べ 16.1vol.% 減少した。圧力が不十分で VGCF+MP が凝集した部分も多く観察された。その影響により閉気孔が多く存在し、20.2vol.% の NaCl が除去されなかったと思われる。

75MPa の圧力を与えた場合、気孔率約 69.3vol.% のプリフォームが作製できた。NaCl 36.3vol.% の添加による気孔率は 38.5vol.% の体積率が得られた。最初の 36.3vol.% NaCl はほとんど除去された可能性がある。焼結体内部の NaCl は高圧力により配置が制御され、スパーサー法による気孔は開気孔である

連続気孔になったと考えられる。以上により、スパーサー法による約 30% の体積率を持つアルミニウム鑄造用多孔体炭素プリフォーム (VGCF+MP) 作製が可能になった。

今回の研究に続き、他の気孔性状の制御も行い、低コストで有害物質や不必要なエネルギーも可能な限り抑制するゼロエミッションエネルギーの適用に一步進んで行けるようになることが望まれる。

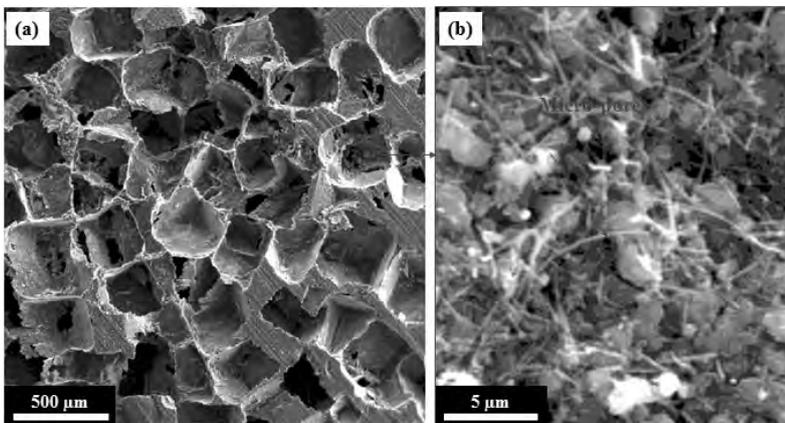


図2 多孔体プリフォームの SEM 観察(75MPa) (a)プリフォームの表面-低倍 (b)プリフォームの表面-高倍

[口頭発表リスト]

李 オギョン、崔 龍範、杉尾健次郎、松木一弘、佐々木元，“VGCF を用いた Al 含浸用炭素多孔体プリフォームの作製”，日本金属学会 2014 年秋期講演大会，2014 年 9 月 24 日～26 日，名古屋大学

Y. Omuro, O. Lee, T. Hirose, K. Sugio, G. Sasaki, T. Hinoki, “Relationship between thermal conductivity and microstructure controlled by rolling for VGCF/Al composites”, Proc. of the 5th Int’l Symp. of Advanced Energy Science (2014.9.30-10.2) Kyoto University Uji Campus, Kyoto, Japan p.182

マイクロ波によるプラズマ乱流計測

稲垣 滋¹, 永島芳彦¹, 佐々木真¹, Maxime Lesur¹, 長崎百伸²,

小林伸二², 山本 聡², 大島慎介² 鈴木文子², 岸川英樹²

¹九州大学応用力学研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 本研究の目的

近年、計測器の時間分解能の向上が著しい。特にマイクロ波に関しては数 10GHz で振動する電場を周波数ダウンコンバートする事無く直接検出する事が可能になってきた。そこで本研究ではこのような計測器の進展に応じた新たなマイクロ波計測システムの開発を目的とする。開発した手法を用いて磁化プラズマ中のマルチスケール乱流の非線形結合の観測を目的とする。本研究には、マイクロ波技術による大容量データの取得に加え、信号処理技術の確立やプラズマ乱流理論の進展といった多くの要素がある。今年度はこの新マイクロ波計測器をエネルギー理工学研究所のヘリオトロン J 装置実験に適用する。

2. 平成 26 年度の成果

マイクロ波反射計は車載レーダー等にも用いられている技術であるが、高温磁化プラズマ研究においては局所的な密度揺動を計測するための標準的なツールであり、プラズマ乱流計測で広く使われてきた。近年の乱流輸送研究の進展により、空間一点計測でなく、乱流の同時多点計測が求められている。今回は入射波が 3 つの周波数(24, 28, 31 GHz)を含み、同時 3 点計測が可能な反射計を構築し、ヘリオトロン J 装置実験に適用した。ヘリオトロン J における多周波数マイクロ波反射計は超高速デジタルストレージオシロスコープ(Teledyne-Lecroy 社製)にて、サンプリング(80Gs/s)にてデータを取得している事に特徴がある。デジタルデータに様々なミキシング、フィルタリングや平均化を試行する事が出来る。解析手法の改善により計測精度向上の可能性はある。更にダウンコンバート及びダウンサンプリングによって生ずる波形の歪みや失われてしまう速い情報の影響を評価する事が出来る。今回は通常の FFT 解析を適用した結果について述べる。FFT 解析によって得られた典型的な入射波、反射波のスペクトルを図 1 に示す。入射波に比べ反射波のスペクトルは乱流揺動の影響で広がっている。

これまでのマイクロ波計測では入射波と反射波を IQ-Mixer によってミキシングし、周波数をダウンコンバートし、位相差と反射波強度を計測する。本方式ではこれをデジタル的に行った。まず非常に狭帯域のバンドパスフィルターを適用した。Mixing においては搬送波の位相遅れは重要であるが、振幅変調の位相遅れも重要である。このため群位相遅れが全ての周波数に対してほぼ一定である 4 次のベッセルフィルターを用いた。通常のアナログフィルターは過去の信号のみを使って現在の信号を

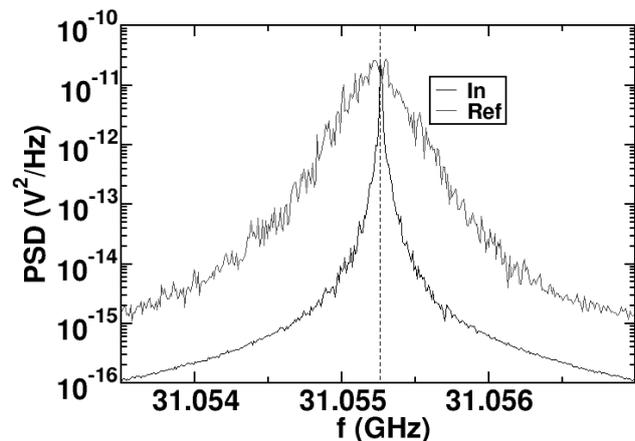


図 1 典型的な入射波、反射波のスペクトル

決めるが、デジタルフィルターでは未来の信号が使える。デジタルフィルターを適用する際、過去および未来の信号を使い、位相遅れを補償した。また、この補償により振幅減衰率は 8 次ベッセルフィルターと同等になる。通過帯域は例として 31 GHz の入射波、反射波を対象とする場合は 30.9-31.1 GHz とした。通過帯域はノイズレベルと対象とする揺動の帯域で決まる。乱流揺動の典型的なスペクトルの帯域は 0.001-0.01GHz であり、今回の通過帯域 0.2 GHz は十分に広い。バンドパスした信号をヒルベルト変換し解析信号を求めた。解析信号は複素数であるので入射波と反射波の除算によって瞬時位相差を求める事が出来る。図 2 に反射波の瞬時振幅と反射波と入射波との瞬時位相差を示す。この瞬時振幅にスペクトル解析を行い、密度揺動を求めた。図 3 に示す様に数 10kHz 帯にコヒーレンスの高いモードがあり、乱流的なモードは 1MHz 程度まで広がっている。パワーは f^4 で減衰する。

乱流が駆動する輸送や構造形成の統合的理解のためには異スケール間のエネルギーのやり取りの同定が必須であり、揺動間の非線形結合の時間変化の評価が重要である。新たなマイクロ波計測の開発により、磁化プラズマの乱流構造解析ツール整備する事でプラズマ乱流研究の新たな展開がもたらされると期待される。

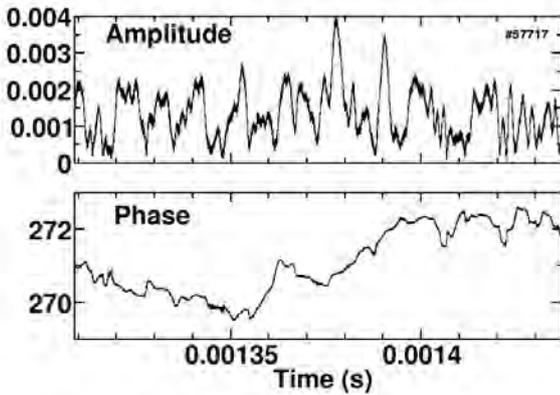


図 2 31GHz の反射波の瞬時振幅及び入射波との瞬時位相差の時間発展

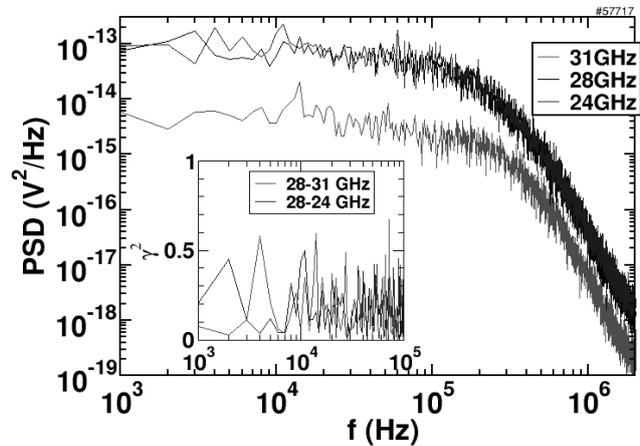


図 3 瞬時振幅のスペクトル。28GHz のチャンネルを基準としたクロスコヒーレンスも示す。

3. 平成 26 年度成果発表

[論文発表リスト]

- [1] S. Inagaki et. al., “Identification of quasi-periodic nonlinear waveforms in turbulent plasmas” Plasma Fusion Res. 9 1201016 (2014)
- [2] S. Inagaki et. al., “Study of Non-linear Coupling of Fluctuations at Long Distance in LHD” Nuclear Fusion 54 114014 (2014)
- [3] S. Inagaki et. al., “Higher Harmonics in the Perturbative Transport Study in TJ-II ECH Plasma” Plasma Fusion Res. 9 1202052 (2014)

[口頭発表リスト]

- [1] “Dynamic method to study turbulence and turbulence transport” 254th IAEA Fusion Energy Conference (St. Petersburg), Oct 18 (2014)
- [2] S. Inagaki et. al., “Application of Microwave Frequency Comb for Plasma Diagnostics” Plasma Conference 2014 (Niigata), Nov. 18 (2014)

トーラスプラズマのトロイダル方向 2 点における 電子サイクロトロン波放射同時計測

吉村泰夫¹, 長崎百伸², 佐野史道², 水内 亨², 岡田浩之², 南 貴司², 小林進二², 山本 聡²,
門信一郎², 大島慎介², 岡村昇一¹, 久保 伸¹, 下妻隆¹, 伊神弘恵¹, 高橋裕己¹

¹核融合科学研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究の目的

京都大学エネルギー理工学研究所のヘリカル軸ヘリオトロン高温プラズマ実験装置 Heliotron J に、核融合科学研究所の Compact Helical System (CHS) で用いられていた ECE 測定器を移設し、Heliotron J 既設の ECE 測定器との同時計測を行う。二台をトロイダル方向およびポロイダル方向に離れた位置を測定するように配置することにより、それぞれで測定された電子温度の時間変化に現れる揺動の位相差や相関などを調べ、揺動の空間構造を明らかにする。

2. これまでの経緯

Heliotron J 既設のラジオメータシステムは、Heliotron J から ECE 信号を伝送するための導波管伝送路、Heliotron J の加熱装置である 70GHz ジャイロトロンの発振周波数帯の高強度信号を減衰させるためのノッチフィルター、ローカル発振器とミキサを用いた差周波数 (IF) 発生部、差周波信号を周波数帯域毎に分離し増幅するフィルターバンク、信号を増幅するアンプ、ディテクタなどで構成され、Heliotron J の #11.5 ポートからの ECE 信号を測定している。CHS ラジオメータの新たな測定位置を #7.5 ポートとして決定し、受信アンテナ、導波管伝送路を設置した。これにより異なるトロイダル位置における ECE 信号受信が可能となった。

初期性能確認として、#7.5 ポートで受信した ECE 信号を CHS ラジオメータのフロントエンド部に入力し、その IF 出力を CHS ラジオメータのバックエンド部および Heliotron J ラジオメータのバックエンド部に入力した場合のデータを比較した。比較の結果、二台のラジオメータのバックエンド部からの出力は、CHS ラジオメータ側にノイズが多いものの、ノイズ成分を除いたデータの時間変化としてはほぼ相似であり、感度校正を行えば電子温度測定が可能であることが分かった。

しかしその後 70GHz ジャイロトロンの運転領域の変更を行った結果、Heliotron J ラジオメータには強いジャイロトロンノイズが乗るようになり、計測が困難になった。

3. 平成 26 年度の成果

Heliotron J ラジオメータのジャイロトロンノイズを除去し ECE 計測を可能とするために、ジャイロトロン発振周波数である 70GHz を含む 73GHz 以下の周波数帯をカットするハイパスフィルター (QUINSTAR TECHNOLOGY, INC. HPF QFH-73SE00) を本研究経費により購入し、Heliotron J ラジオメータ用導波管に挿入した。しかしそれでもノイズは除去しきれなかったため、新たな対策を講ずる必要がある。

そのため、今年度は主に CHS ラジオメータを用いた多チャンネル ECE 計測を行った。図 1 に示すのはその一例であり、電子サイクロトロン電流駆動 (ECCD) 実験の際の ECE 計測結果である。横軸は ECCD のためにトロイダル方向への斜め入射を行う 70GHz EC 波ビームの屈折率の磁力線との平行方向成分 N_{parallel} 、縦軸はプラズマ中心付近からの ECE 信号強度である。ECCD のためには N_{parallel} を有限の値とする必要があり N_{parallel} の増大とともに駆動される電流が増加すると共に、ECE 信号強度も増加することが分かる。この ECH 信号強度の増加はバルクプラズマの電子温度上昇を表すものではなく、EC 波の斜め入射により生成された非熱的電子からの電子サイクロトロン放射やシンクロトロン

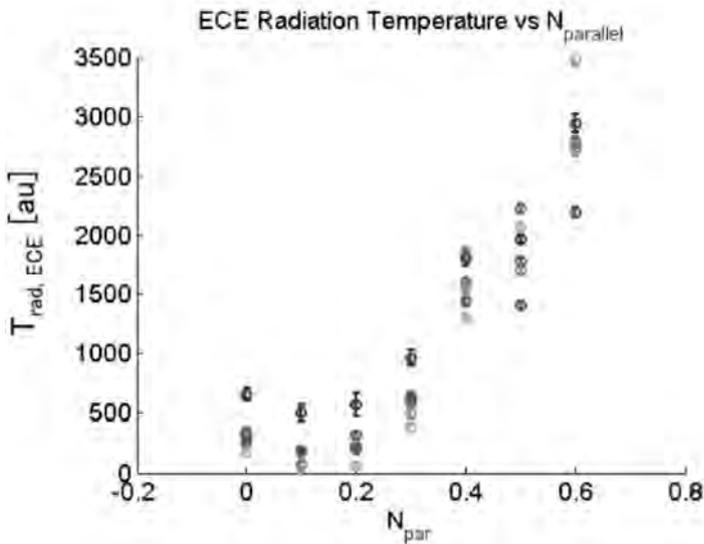


Fig. 1 Strength of ECE signal is plotted as a function of parallel component of refractive index of 77GHz EC-wave beam applied for ECCD experiment.

ン放射によるものであると考えられる。この計測により、正確なバルクプラズマの電子温度計測のための N_{parallel} 範囲条件が明らかになった。

4. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

K. Nagasaki et al., "Plasma Start-up Using Microwaves in Fusion Devices", The 9th International Workshop "Strong Microwaves and Terahertz Waves: Sources and Applications", Nizhny Novgorod - Perm - Nizhny Novgorod, July 24 - 30, 2014

K. Nagasaki et al., "Control of Energetic-Particle-Driven Modes by ECH/ECCD in Helical Systems", 18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, April 22nd-25th, 2014

S. Yamamoto et al., "External Control of Energetic-ion-driven MHD Instabilities by ECH/ECCD in Heliotron J Plasmas", 25th IAEA Fusion Energy Conference, Saint Petersburg, Russia, Oct. 13-18, 2014, EX/P4-27

長崎百伸 et al., "ヘリオトロンJにおける電子バーンスタイン放射計測の検討", Plasma Conference 2014, Nov. 18-21, 2014, 朱鷺メッセ, 新潟, 21PB-063

[論文発表リスト]

K. Nagasaki, S. Yamamoto, S. Kobayashi, K. Nagaoka, E. Ascasibar, M. Osakabe, Y. Yoshimura, et al., "Control of Energetic-Particle-Driven MHD Modes by ECH/ECCD in Helical Systems" (査読無し)
to be published in European Physical Journal Web of Conferences

Y. Yoshimura, H. Kasahara, K. Nagasaki, M. Tokitani, N. Ashikawa, Y. Uede, S. Ito, S. Kubo, T. Shimosuma, et al., "Long-Pulse Plasma Discharges by Upgraded ECRH System in LHD" (査読無し)
to be published in European Physical Journal Web of Conferences

有機薄膜太陽電池の高効率化を目指した 有機-無機ハイブリッド膜の開発

秋山 毅¹、坂口浩司²

¹滋賀県立大学工学部材料科学科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

次世代の太陽電池として、有機薄膜太陽電池が注目を集めており、その高効率化を目指した種々の研究開発が展開されている。一方、金や銀などの貴金属ナノ粒子がそのプラズモン共鳴にもとづいて光を吸収すると、ナノ粒子表面のナノ空間に局所的に増強された電場（局在表面プラズモン共鳴）が発生することが知られている。この電場は色素や分子を励起できることが知られており、分光分析の高感度化や、有機薄膜太陽電池の効率向上への応用について活発な研究が展開されている。この背景から、本研究では有機薄膜太陽電池の高効率化の機構解明を促進する複合材料・複合膜の開発を目的とした検討を進めてきた。昨年度までに逆型有機薄膜太陽電池にナノ粒子を導入し、その光電変換特性へのナノ粒子組み込みの効果について知見を得ることができた（図1）。

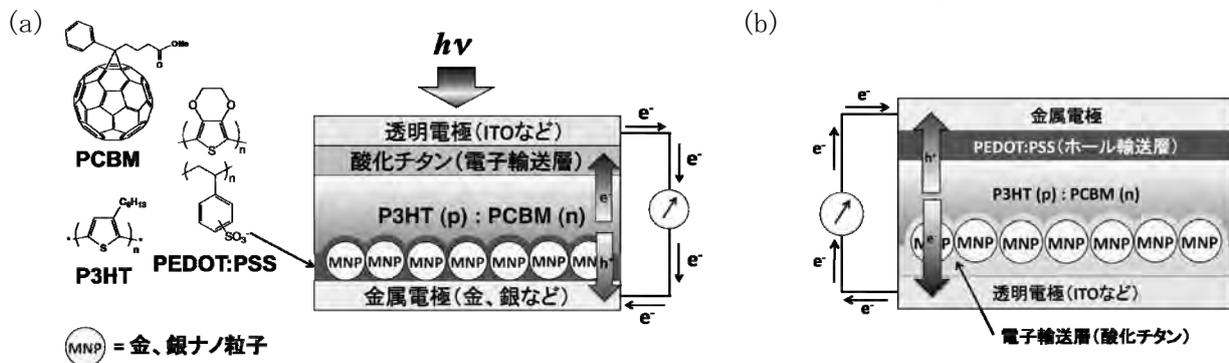


図1 逆型有機薄膜太陽電池の(a)ホール輸送層にナノ粒子を組み込んだ系、(b)電子輸送層にナノ粒子を組み込んだ系の模式図

関連する研究展開のひとつとして、異種金属ナノ粒子を複合的に用いれば、より広い波長範囲の光から局在表面プラズモン共鳴を誘起し、有効に光エネルギーを利用することができると期待できる。しかしながら、異種金属ナノ粒子を複合的に用いた研究例は充分であるとは言えない。そこで本年度は、図1 aの太陽電池に金・銀ナノ粒子を複合的に用いた太陽電池を作製し、その特性評価を行った。

また、図1 bの系の酸化チタンを代替可能で、ナノ粒子と複合化可能な有機電子輸送材料としてフラーレン集合体およびその薄膜の開発を行った。

2. 実験

常法に従い、塩化金酸または硝酸銀の水溶液を加熱還流し、クエン酸三ナトリウムを還元剤・保護剤として加え、金および銀ナノ粒子のコロイド水溶液を合成した。これらのナノ粒子コロイド水溶液と、ホール輸送材料であるポリエチレンジオキシチオフェン：ポリスチレンスルホン酸ナトリウム（PEDOT:PSS）水溶液の混合溶液を調製した。また、インジウム-スズ酸化物（ITO）透明電極表面にチタンアルコキッド溶液をスピコート製膜し、加熱処理を行った。続いて、ポリ-3-ヘキシルチオフェン（P3HT）とフラーレン誘導体（PCBM）の混合溶液をスピコート製膜して光活性層を得た。その後、ナノ粒子を含む PEDOT:PSS 水溶液を同様にスピコートした後、対向電極として銀を真空蒸着して、ナノ粒子を組み込んだ逆型有機薄膜太陽電池を得た。ナノ粒子を含まない太陽電池についても

同様な方法で作製して用いた。これらの構造と諸特性は、電子顕微鏡、吸収スペクトル、蛍光スペクトル、光電流—電圧測定などの手法を用いて評価した。

また、フラーレン集合体については、まずトルエン中でC₆₀フラーレンとエチレンジアミンを混合して得られた微粒子を、大過剰のエチレンジアミンに溶解させた。この溶液を電極あるいは適当な基板表面にキャストして薄膜とした。

3. 結果と考察

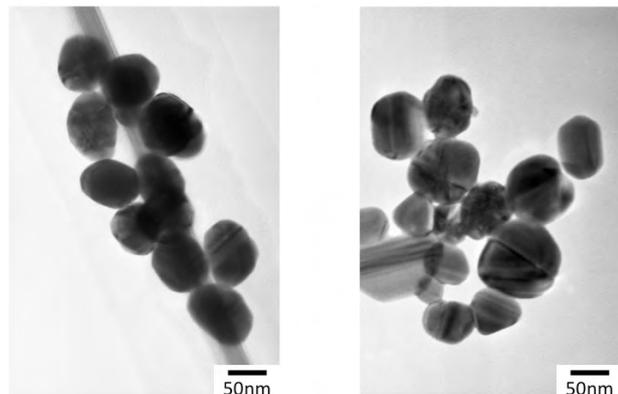


図2 (左)金ナノ粒子、(右)銀ナノ粒子のTEM像

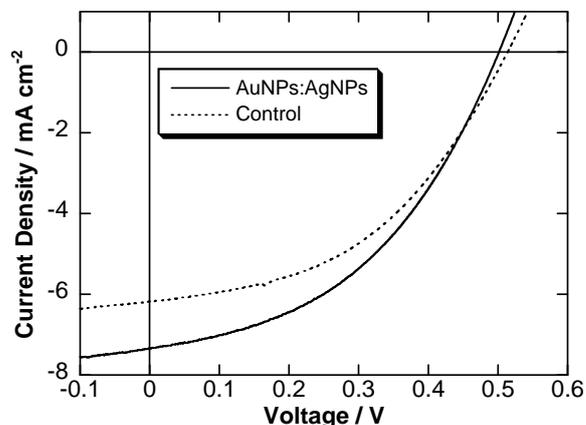


図3 金・銀ナノ粒子を組み込んだ有機薄膜太陽電池(AuNPs:AgNPs)とナノ粒子を含まない参照系(Control)の光電変換特性

金・銀それぞれのナノ粒子はおよそ70nm程度の粒径であることが透過型電子顕微鏡(TEM)観察の結果から明らかとなった。吸収スペクトルから、ナノ粒子の吸光度はP3HT:PCBMからなる光活性層の吸光度に比べて著しく低いことが示された。しかしながら、太陽電池の部分構造の蛍光励起スペクトルを評価したところ、ナノ粒子の存在によって光活性層の励起効率が向上していることが示唆される結果を得た。人工太陽光源(100 mW/cm², AM1.5)の照射下で、金・銀ナノ粒子をホール輸送層に組み込んだ太陽電池は、ナノ粒子を含まない参照系と比較して、短絡光電流密度が向上している事が明らかとなった(図3)。この短絡電流の向上には、ホール輸送層の電気的な特性の変化と局在表面プラズモン共鳴の双方が関与している可能性があり、より詳細な検討を進めている。

一方、フラーレン集合体薄膜については、電子輸送材料として有望であることが示唆される結果を得ており、ナノ粒子との複合化を目指した製膜条件の探索を進めている。

[口頭発表リスト]

1) Tsuyoshi Akiyama, "Incorporation effect of nanoparticles into buffer layer on inverted organic thin-film solar cells", The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (2014. 9. 30)

2) 八木雄太郎、松本泰輔、奥 健夫、秋山 毅 "金,銀ナノ粒子を組み込んだ逆型有機薄膜太陽電池の作製と評価", 第58回日本学術会議材料工学連合講演会、京都テルサ (2014.10.27)

[論文発表リスト]

1) Tsuyoshi Akiyama, Takuji Nishida, Taisuke Matsumoto, Hiroshi Sakaguchi, Atsushi Suzuki and Takeo Oku, "Effect of gold nanoparticle in hole-transport layer on inverted organic thin-film solar cell performance", *physica status solidi (a)*, vol. 211, pp. 1645-1650, (2014).

2) Yuji Ono, Tsuyoshi Akiyama, Shoto Banya, Daisuke Izumoto, Jo Saito, Katsuhiko Fujita, Hiroshi Sakaguchi, Atsushi Suzuki and Takeo Oku, *RSC Advances*, vol. 4, pp. 34950-34954, (2014).

3) Yutaro Yagi, Tsuyoshi Akiyama, Taisuke Matsumoto, Hiroshi Sakaguchi and Takeo Oku, "Effects of Incorporation of Gold and Silver Nanoparticle Mixtures on Photovoltaic Performance of Inverted Organic Thin-Film Solar Cells", 投稿中

Fe 系構造材料中のナノクラスター解析

渡辺英雄¹, 大西隆敬¹, 木村晃彦²

¹九州大学 ²京都大学

1. 研究目的

原子炉構造材である圧力容器鋼は、原子炉の高経年化に伴い、中性子照射による照射脆化が懸念されている。圧力容器鋼の照射硬化型脆化メカニズムとしては、1)Cu 析出物が原因によるもの。2)マトリクス欠陥によるもの。この2つの脆化メカニズムが提案されている。特にマトリクス欠陥の形成に伴う照射脆化のメカニズムを解明するためには、照射欠陥集合体（格子間原子型(I)、空孔型(V)転位ループ）の形成挙動を明らかにすることが必要である。照射欠陥の形成には、添加されている様々な溶質原子が大きく関与していると考えられており、特に Mn は転位ループ形成に重要な元素である。そこで、本研究では Mn 含有量の異なるモデル合金に鉄イオン照射を行い、それらの硬度変化及び組織観察からマトリクス欠陥の形成メカニズムを検討する。

2. 研究方法

試料には Pure-Fe、Fe-1.4 wt%Mn、Fe-1.4 wt%Mn-0.8 wt%Ni 及び、これらに 0.1 wt%の Cu を添加した試料を用いた。これらの試料を用いて九州大学超高压電子顕微鏡室設置の超高压電子顕微鏡 (JEM-1000) で加速電圧 1.0MV の電子線照射によるその場観察を室温から 400°C の範囲で行った。重イオン照射実験 (照射量依存性、温度依存性) には九州大学応用力学研究所設置の HVEE 社製タンデム型加速器を使用し、2.4MeV の Fe²⁺イオンを用いた。照射温度は室温・290°C・320°C・350°C、照射量は 0.01、0.1、0.3、0.5、1.0dpa とした。重イオン照射実験 (フラックス依存性) には京都大学エネルギー理工学研究所の照射施設 DuET を使用し、6.8MeV の Fe³⁺イオンを用いた。照射温度は 290°C、照射強度は 8.6×10^{10} ions/cm²s、 2.56×10^{11} ions/cm²s、 2.48×10^{12} ions/cm²s、照射量は 1.0dpa とした。硬度測定には、九州大学応用力学研究所設置の超押し込み硬さ試験機(株)ELIONIX 社製 ENT-1100 と京都大学エネルギー理工学研究所設置の NanoIndenter G200 (Agilent Technologies) を用いて、ナノインデンテーション硬さ H_{IT} を算出し比較を行った。

3. 実験結果及び考察

図 1 はそれぞれの試料に 290 °C で電子線照射を行った後の転位ループ密度の照射時間依存性である。この結果から、Mn 添加試料の転位ループ密度が大きく上昇していることが分かった。Pure-Fe は転位ループ密度がほとんど上昇しなかった。Fe-1.4 wt%Mn と Fe-1.4 wt%Mn-0.1 wt%Cu を比較すると Cu が添加されたことによる転位ループ密度の上昇はなかった。図 2 はモデル合金に 290°C で重イオン照射したときの照射による硬度変化の値である。Pure-Fe や Fe-0.1 wt%Cu は照射による硬度の変化がほとんどないが、Mn が添加された試料は硬度が大きく上昇している。Mn が添加された試料では転位ループが多く形成され、これにより硬度が上昇していると考えられる。また、Cu 無添加の試料と Cu が添加された試料を比較すると硬度変化の差はほとんどない。図 3 は Fe-1.4 wt%Mn-0.1 wt%Cu に 290°C で 1 dpa 重イオン照射した後の EDS 元素分析の結果である。黄色の○印は左から転位ループ、Mn 濃縮箇所、Cu 濃縮箇所となっている。転位ループの箇所と Mn 元素、Cu 元素の偏析箇所が一致しており、独立した Cu の析出はないことが分かった。これらの結果から、重イオン照射のように照射強度の高い条件では、Cu のクラスターは形成されにくく、転位ループの形成が硬度上昇の原因となることが考えられる。

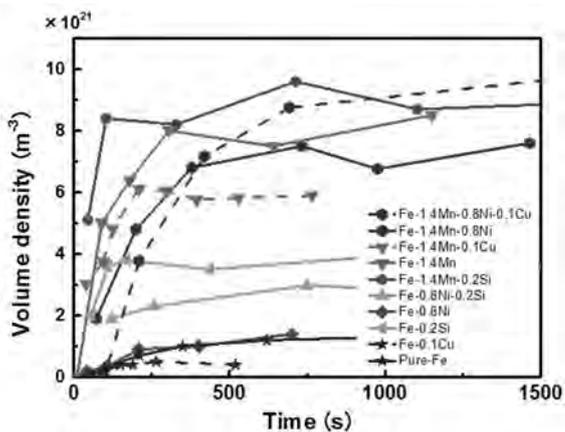


図1 転位ループ密度の照射時間依存性

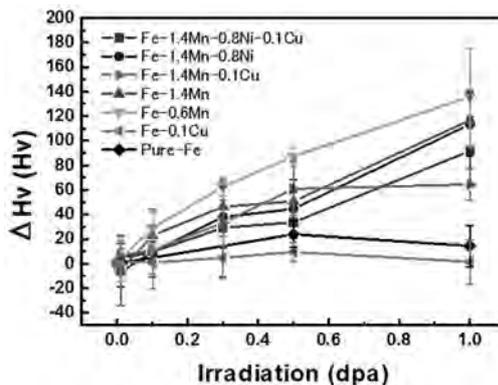


図2 イオン照射による硬さ変化

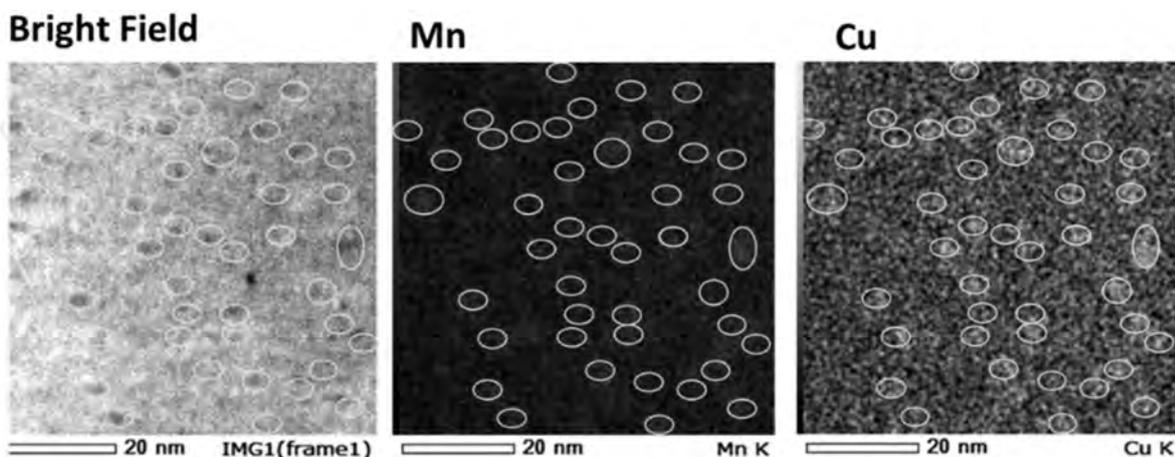


図3 電子顕微鏡による銅クラスターマッピング

4. 成果発表

- 1) ICFRM16 北京、平成25年11月“Effects of Cu on radiation induced hardening of A533B under irradiation” H. Watanabe, S. Arase, N. Yoshida, Y. Kamada, T. Yamamoto, G. R. Odette
- 2) TMS2015 オランダ、米国、平成27年3月(予定) "Effects of Cu and Mn on Radiation Induced Hardening and microstructure" H. Watanabe, Y. Kamada
- 3) TMS2015 オランダ、米国、平成27年3月(予定) "Effects of dose rate and primary defect structure on microstructural evolutions in RPV steels" T. Yamamoto, H. Watanabe et al.
- 4) ” Effects of Mn Addition on Dislocation Loop Formation un A533B and Model Alloys” Watanabe, H., Masaki, S., Masubuchi, A., Yoshida, N., Dohi, K., Journal of Nuclear Materials 439(2013) 268.
- 5) “Effects of Stress on Radiation Induced Hardening of Fe-Mn Model Alloys” Watanabe, H., Hiragane, A., Shin, S., Yoshida, N., Kamada, Y., Journal of Nuclear Materials 442(2013) 776

核融合炉プラズマ対向材料の特性に及ぼす照射効果

徳永和俊¹, 荒木邦明¹, 藤原 正¹, 堀田智宏², 尾崎浩詔², 徐 虬³,
木村晃彦⁴, 近藤創介⁴, 橋富興宣⁴, 大村高正⁴

¹九州大学応用力学研究所, ²九州大学大学院総合理工学府,
³京都大学原子炉実験所, ⁴京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

核融合炉の第一壁・ブランケット及びダイバータは、DT 反応により発生する 14MeV 中性子及びヘリウムの照射により照射損傷を受け、その特性が劣化する。本研究では、第一壁やダイバータの表面材料として有望なタングステン(W)材やその接合材料等に対して水素挙動、熱負荷挙動及び強度を調べると共に、これらに対する中性子及びヘリウム照射の影響を高エネルギーイオン照射により模擬し、中性子及びヘリウムの照射損傷の影響を明らかにする。本年度の研究では、W と低放射化フェライト鋼の被覆・材料に関して、特に熱負荷特性を調べた結果について報告する。タングステンはスパッタリング及び熱特性に優れており、核融合炉の第一壁及びダイバータ板のアーマ材料の候補材料となっている。この第一壁及びダイバータ板の表面は、プラズマからの定常熱負荷(数 MW/m²)やディスラプション(数 ms, 数 10MJ/m²)等のパルス熱負荷を受ける。そのため、タングステン材について熱負荷特性を評価する必要がある。本研究では、タングステン材及びそれを用いた試験体の熱負荷特性を評価することを目的とし、タングステン被覆低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(W/F82H)を冷却管付き無酸素銅(OFHC)に接合した試験体の熱応答に関する熱解析を行い、その温度分布、熱応力、冷却水への熱伝達挙動等を調べた。さらに、熱負荷実験結果と比較し、試作した試験体の性能を検討した。

2. 方法

熱負荷実験を行った試験体の 1/2 モデルを作成し、有限要素法を用いた汎用コード(ANSYS)により熱解析を行った。図 1 に作成したモデルを示す。試験体モデルは、20mmx10mmx1mm の W を接合した低放射化フェライト・マルテンサイト鋼(F82H, Fe-8Cr-3W) (20mmx20mmx2.6mm)に内径 7 mm の冷却管付きの 20x20x20mm の無酸素銅を接合したものである。このモデルに温度依存性を考慮した熱伝導率、比熱、密度等の物性値を定義した。境界条件として、20mmx20mm の W 表面に熱流束を負荷した。さらに、冷却管内壁から冷却水への熱伝達に関して、その熱伝達係数を相関式を用いて定義した。熱解析は、熱流束を変化させて試験体の温度分布を求めると共に、3.4MW/m²の熱流束を負荷した場合の構造解析シミュレーション(変形図、応力分布図)も行った。拘束条件として、変形図、応力分布図共に冷却管内壁を拘束している。実験で用いた試験体は、F82H の表面にプラズマ溶射法(VPS 法)により W を 1 mm 被覆し、さらに、冷却管付きの OFHC に冶金接合することにより作製した。実験では、冷却管を水冷した状態で、W 表面を電子ビーム照射し加熱した。冷却条件は、流速は 18m/s、入口の冷却水の温度は 20℃、冷却水の圧力は 0.7MPa である。また、電子ビーム照射中、W の表面温度を放射温度計で測定すると共に、F82H 及び OFHC の温度を熱電対を用いて測定した。

3. 結果

図 2 に 3.4MW/m²の熱流束を負荷した場合の試験体の温度分布を示す。W 表面から OFHC の冷却管まで温度は連続的に変化しており、特に、熱伝導率が小さい F82H 部分における温度変化が大きいことがわかる。図 3 及び図 4 に、熱解析及び熱負荷実験による試験体の各部分の温度の熱流束依存性をそれぞれ示す。それぞれの熱流束に対して、OFHC の温度は、解析及び実験結果がほとんど一致している。冷却管内壁から冷却水への熱伝達は、熱伝達係数を相関式を用いてモデル化している。従って、その相関式により熱伝達を精度良くモデル化しているものと考えられる。また、W の表面温度及び F82H 部分の温度は、実験結果が高い値となっている。W の表面温度は、実験では熱流束が小さい場合、W 表面の凹凸によりホットスポットが発生し、放射温度計を用いた温度測定に影響を及ぼすことにより低熱流束の場合に表面温度が高いものと考えられる。また、熱解析では、理論密度が 100%に近い一般的な粉末焼結 W の熱伝導率を使用している。一方、実験に用いた試験体の W は、プラズマ溶射法

により F82H の表面に被覆した VPS-W である。VPS-W は、液体または、それに近い状態から急冷されているため原子空孔等が多いものと考えられる。そのため、VPS-W の熱伝導率は W より小さいものと考えられ、これにより、実験での表面温度等が高いものと考えられる。さらに、VPS-W と F82H 及び F82H と OFHC の接合界面部分では完全に接合されておらず、部分的に熱抵抗があることが考えられる。特に、実験結果では、F82H と OFHC の温度差が大きく、この接合界面での熱抵抗が大きいものと考えられる。図 5 に 3.4MW/m^2 の熱流束を負荷した場合の試験体の変形量の計算結果を示す。冷却管から距離が離れた温度上昇の大きい部分ほど変形量が大きく、最大で $39.7\mu\text{m}$ 変形していることが分かる。また、図 6 に 3.4MW/m^2 の熱流束を負荷した場合の試験体に働く応力強さの計算結果を示す。特に、F82H の上部部分で 0.94GPa の最も大きな応力が働いている。今後、W の熱伝導率、接合界面の熱抵抗を変化させ実験結果と一致させることにより、試験体の性能についてさらに精度よく評価する。また、熱応力解析により求めた接合界面に働く応力から、界面の強度評価を行う。さらに、各種タングステン材の電子ビーム熱負荷実験を行い、熱負荷特性、ヘリウム及びイオンビーム予照射効果等について研究を進める。

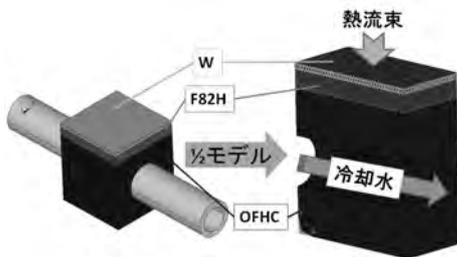


図 1 作成した試験体モデル



図 2 試験体の温度分布 (熱流束 3.4MW/m^2)

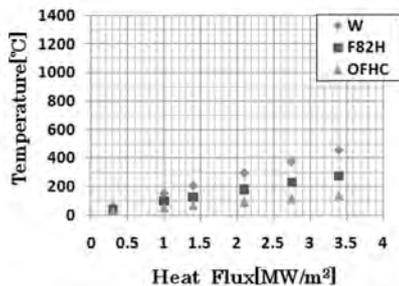


図 3 温度の熱流束依存性

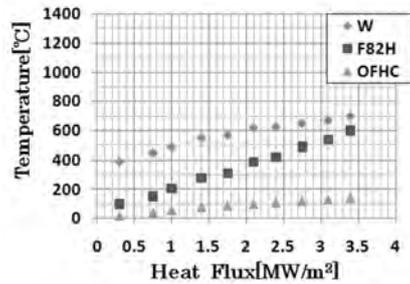


図 4 温度の熱流束依存性 (実験)

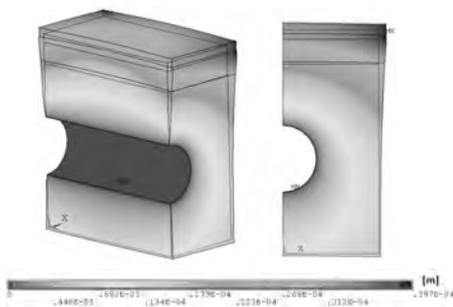


図 5 試験体の変形図 (熱流束 3.4MW/m^2)



図 6 試験体の応力強さ分布 (熱流束 3.4MW/m^2)

4. 本年度発表リスト

[口頭発表リスト]

K. Tokunaga, K. Araki, H. Osaki, Q. Xu, A. Kimura, S. Kondo, O. Hashitomi, T. Ohmura, Radiation effects on properties of plasma facing materials in fusion reactor, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science ~ Contribution to Zero-Emission Energy ~, 2014 年 9 月 30 日~10 月 2 日、宇治 (京都) (ポスター)

SiC/SiC 複合材料の疲労寿命評価手法に関する研究

野上修平¹, 河合大地¹, 長谷川晃¹, 檜木達也²

¹ 東北大学大学院工学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景

ゼロエミッションエネルギーシステムの一つであり、次世代の基幹エネルギー源として期待される核融合炉の安全・安心と経済性の両立を実現するためには、構造材料の長寿命化と、適切な寿命管理が不可欠である。SiC 繊維強化 SiC マトリックス複合材料 (SiC/SiC 複合材料) は、低放射化材料として優れており、高温強度も高いことから、ITER 以降の次世代の核融合炉用構造材料として有力な候補であるが、疲労寿命の高精度な評価が課題の一つとなっている。しかし、セラミックス基複合材料を対象とした疲労試験技術の標準化は充分ではなく、評価結果は評価機関や装置などに依存している。

従来、セラミックス基複合材料では引張の片振り疲労試験を安全側の評価として用いることが多かったが、引張/圧縮両振り疲労試験や圧縮の片振り疲労試験での十分な評価は行われていない。本研究では、SiC/SiC 複合材料について引張/圧縮両振りモードおよび引張、圧縮片振りモードの低サイクル疲労試験手法の開発を目的とした。

2. 実験方法

供試材は、図 1 に示す Hypertherm 社製の化学気層浸透法 (CVI 法) で作製された平織り CVI-SiC/SiC 複合材料である。繊維は宇部興産社製の Tyranno SA3 (7.5 μ m 径、1600 本/ヤーン) である。試験片として、図 1 に示す試験部の直径 1.7mm の平滑丸棒試験片を用いた。つかみ部平面に織られた面が向き、厚さ方向に積層されている。荷重軸方向に対しては平行及び垂直に繊維が配向されている。表面状態は疲労特性に大きく影響するため、#800 相当の条件まで自動研磨装置で軸方向に仕上げた。

疲労試験は、神戸工業試験場社製の微小疲労試験機を用いて実施した。試験片は両端の端部及び肩部を挟むことで、試験機シャフトに固定される。本試験機はピエゾアクチュエータ駆動型で、制御盤からの荷重・変位信号出力により、ファンクションゼネレータとピエゾサーボシステムを介してピエゾ素子に電圧を負荷し、ピエゾアクチュエータを伸縮させることで試験片に荷重を負荷する。試験片の伸縮の計測は試験片に固定した歪ゲージ式変位計で計測される。変位計はバネ力を利用して試験片に固定されている。疲労試験は、室温大気中において、軸ひずみ制御のもと、引張/圧縮、引張/引張および圧縮/圧縮の 3 種類の負荷モードにおいて実施した。軸ひずみは、ひずみ速度 0.01%/s において三角波で制御し、全ひずみ範囲は 0.06% および 0.12% であった。

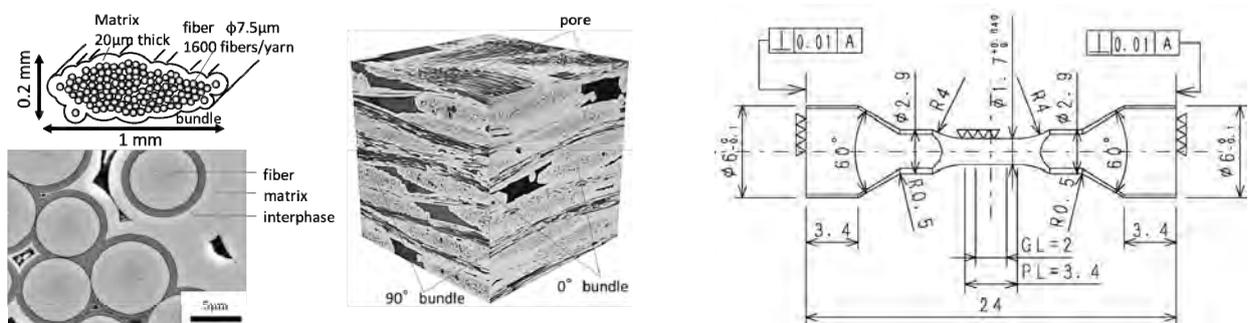


図 1. 本研究で使用した SiC/SiC 複合材料のマクロ組織と疲労試験片の形状

3. 実験結果

全ひずみ範囲 0.06% の場合、供試材の比例限度応力 (PLS : proportional limit stress) が 100 MPa 程度であることから、疲労試験中のピーク応力は素材の PLS を超えることなく、弾性範囲内での試験と考えられる。この場合、ピーク応力の若干の揺動は見られたものの、比較的滑らかなヒステリシスを描き、顕著な変化もなく、疲労試験は推移した。一方、全ひずみ範囲 0.12% の場合は素材の PLS を超える試験と想定される。図 2 に、全ひずみ範囲 0.12% における引張/引張疲労試験および圧縮/圧縮疲労試験のヒステリシスカーブを示す。圧縮/圧縮疲労試験の場合、ピーク応力の若干の揺動は見られたものの、比較的滑らかなヒステリシスを描き、顕著な変化もなく、疲労試験は推移した。一方、引張/引張疲労試験の場合、1 サイクル目においては PLS を超えたことを示す線形性を外れた擬延性的ヒステリシスカーブを描いたのに対し、2 サイクル目以降は全ひずみ範囲 0.06% の場合と同様に、弾性範囲内での試験のような線形性を示すヒステリシスカーブを描いた。よって、ピーク応力が PLS 以上で引張/引張疲労試験の場合には、比較的大きな、もしくは多くの損傷が 1 サイクル目において形成し、その後の繰返し負荷によって形成した損傷が成長したことが考えられる。ただし、ヒステリシスカーブの推移を含めて考察すると、1 サイクル目以降においてはマクロ的に擬延性を示すほどの損傷の発達は起きず、複合材料特有の複雑な繊維織物構造によりき裂成長の停留や偏向も同時に起きたことが想定される。

本研究で適用した試験法により、引張/圧縮、引張/引張および圧縮/圧縮のいずれの負荷モードにおいても、PLS を超える負荷条件において 10^4 サイクルまで安定して試験を行うことが可能であることが実証された。本実験で用いた試験片の評価を行うことで、セラミックス基複合材料の疲労試験標準化のための知見を得られることが期待される。

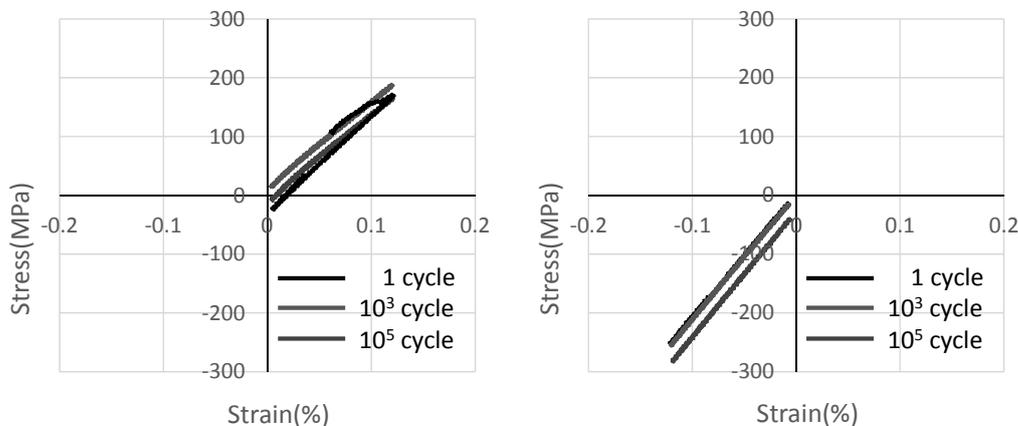


図 2. 全ひずみ範囲 0.12% における引張/引張および圧縮/圧縮疲労試験のヒステリシスカーブ

超音波誘導型細胞質内物質導入法の開発

原田敦史¹, 大槻高史², 中田栄司³

¹大阪府立大学工学研究科

²岡山大学自然科学研究科

³京都大学エネルギー理工学研究所

ドラッグデリバリーシステム (DDS) は薬物等の体内分布を量的・時間的・空間的に制御することを目的としており、近年、化学療法と物理刺激を組み合わせた外部刺激応答型 DDS の開発が盛んに行われている。外部物理刺激を生体外から必要なときに局所的に与えることで時間的・空間的に制御された治療効果を得られる利点がある。外部刺激応答型 DDS の中でも、光線力学療法 (PDT) は、表在性がんの高い治療効果を発現し、QOL が高い次元で維持され、体力の衰えた患者にも適用できるなどの点から新たながん治療法として非常に高い注目を集めている。しかしながら、PDT における光は生体透過性が低く生体深部の疾患への有効性が低いという問題があり、生体深部において効果を発現しうる新規な材料の創製が求められている。そこで、我々は深部疾患に治療効果を発揮できる材料として二酸化チタン (TiO_2) に着目した。 TiO_2 は、紫外光照射によって活性酸素種を生成する特性から有機物質の酸化分解や細菌の死滅・不活性化に利用されているが、近年、超音波照射によってもこの特性が得られることが報告されている。超音波はエコー検査などに用いられているように適切な周波数にすることで、安全に生体深部まで達することができる。これらのことから、 TiO_2 と超音波を組み合わせることで、新規な襲治療法となると期待できる。 TiO_2 ナノ粒子は生理的条件下において、負電荷を持つことが知られており、カチオン性高分子である polyallylamine (PAA) にグラフト鎖として生体適合性に優れた poly(ethylene glycol) (PEG) を導入したグラフト共重合体 (PEG-g-PAA) と静電的に複合化させることで、 TiO_2 ナノ粒子内包ポリイオンコンプレックス (PIC) ミセルの調製を行った。PIC ミセルは、表面を PEG 鎖で覆われ、内核に TiO_2 ナノ粒子を担持したコア-シェル構造をとると考えられる。この PIC ミセルは細胞に取り込まれた後、超音波照射することで、照射部位に特異的な殺細胞効果の発現が確認されている。本年度は、超音波照射によって殺細胞効果を発現するメカニズムに関する検討を行った。

一重項酸素を含む活性酸素種による殺細胞効果の誘導について、ミトコンドリアダメージに由来するとの報告や、細胞外から膜脂質の過酸化を引き起こす可能性などが考えられることから、PIC ミセルが細胞内や細胞外に局在するときの超音波を用いた殺細胞効果を評価した。PIC ミセルが細胞に取り込まれていない条件では、超音波処理のみ行った場合と同程度の

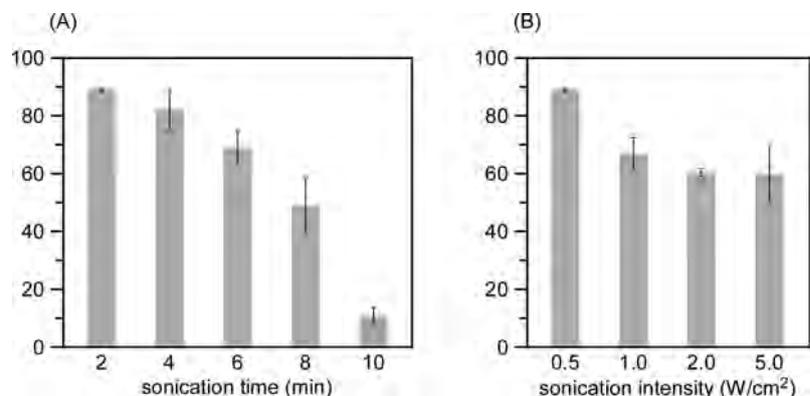


Figure 1. Effect of sonication time (A) and intensity (B) to cell viability of HeLa cells treated by PIC micelles. Sonication (1 MHz, duty cycle 10%, ϕ 6mm) was performed to the almost entire surface of each dish and the cell viability was evaluated by MTT assay.

生存率であり、細胞死の誘導は確認されなかった。一方、ミセルが細胞に取り込まれた場合では優位な生存率の低下が確認された。以上のことから、PIC ミセルが殺細胞効果を示すためには細胞内に取り込まれる必要があると考えられる。また、この細胞死誘導が確認された条件において、Annexin-V/PI 二重染色によるアポトーシス誘導を確認した。フローサイトメトリーによる Annexin-V/PI 二重染色の解析において、4 分割リージョンでの LL (下左)、LR (下右)、UR (上右) は、それぞれ正常細胞、初期アポトーシス細胞、後期アポトーシス/ネクローシス細胞を表す。実験を行った結果、初期アポトーシスを示す LR に分布する細胞が確認され、PIC ミセルを取り込ませた細胞に超音波照射することでアポトーシスを誘導することが確認された。次に PIC ミセルを取り込ませた細胞への超音波照射条件を変化させたときの殺細胞効果について検討した。PEG-g-PAA を用いて調製した PIC ミセルは、超音波の照射時間、強度に依存して活性酸素種を生成することが確認されており、超音波照射時間に依存した殺細胞効果の増強も確認されている (Fig. 1A)。そこで、超音波照射時間を一定にし、超音波の強度が及ぼす殺細胞効果への影響を評価した結果、照射時間と比較して強度が及ぼす生存率への影響は小さかった (Fig. 1B)。これは活性酸素種の寿命が極めて短いことに起因すると考えられる。一重項酸素を含む活性酸素種はミトコンドリアなどを酸化・変性壊死させ、殺細胞効果を発揮するが、細胞質内における一重項酸素の拡散距離は 10-20 nm であることが報告されており、超音波照射により生成した活性酸素種はミセル近傍の限定された範囲にしかダメージを与えられないためだと考えられる。一方で、超音波照射時間をのばした場合には、ミセル自身の拡散により一重項酸素が作用できる範囲が広がったために、照射時間に依存した殺細胞効果の増強が確認されたと考えられる。

Table 1 に種々条件下でのゼータ電位を測定した結果を示す。水中において最も大きなゼータ電位を示した。これは TiO₂ ナノ粒子に対して過剰量のポリマーを添加してミセル調製を行っているため過剰な PAA 主鎖の正電荷に起因するものと考えられる。興味深いのは、同一 pH (pH 7.4)

Table 1. Zeta-potentials of the micelles in various solvents.

	water	Tris-HCl	PBS
PEG2k-g-PAA	22.2 mV	7.0 mV	1.0 mV
PEG5h-g-PAA	42.5 mV	18.5 mV	2.4 mV

に調整した状態において、PBS 中は顕著に荷電が遮蔽されていることである。これは、PAA の水への溶解性が多価アニオンの存在で低下することから、PAA 主鎖への効果的な対イオン濃縮効果が生じ、PBS 中ではほぼ中性のゼータ電位を示したと考えられる。このような効果的な対イオン濃縮効果をキャリアとしての特性として利用することを検討するために、種々アニオン性蛍光色素のミセルへの吸着能を GPC 測定により評価した結果、多価アニオン蛍光色素が効率よく保持された。また、複数の蛍光色素の保持も可能であったことから、sulforhodamine B と calcein を保持させ、HeLa 細胞への取込を共焦点顕微鏡により観察した。両蛍光色素の赤色、緑色蛍光が細胞内で観察された。色素のみを細胞に播種した場合には、細胞膜へ分配されたことから、細胞内の輝点状の蛍光は細胞へ取り込まれたミセルによるものであると考えられる。また、赤色、緑色蛍光の分布が異なる場所も見られることから細胞内でリリースされているものも存在すると考えられる。また、このミセルは、疎水性薬物の可溶性も確認されたことから、超音波照射による活性酸素種生成と種々薬物を組み合わせた治療への展開が期待される。

先進 SiC 基 材料の複合的高温環境特性

下田一哉¹, 李文熙², 檜木達也², 村上秀之¹

¹物質・材料研究機構 先進高温材料ユニット

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

SiC 長繊維強化 SiC 基複合材料 (SiC/SiC) は、優れた高温強度、軽量かつ突出した耐熱性、耐食性、耐摩耗性に加えて潜在的に低誘導放射化特性等を含む耐環境特性から航空宇宙分野や原子力分野での利用が期待されている。近年、原子力発電における過酷事故を起こさない、あるいは事象進展を大幅に遅らせる事故耐性燃料において、SiC/SiC が既存の Zr 合金に代わる燃料被覆管を始めとする炉心材料として研究開発が活発に行われている。本研究では、既存の Zr 合金と比較し、過酷事故を想定した高温水蒸気環境下での SiC/SiC の健全性を検証することを目的とした。

2. 実験

Tyranno-SA3rd SiC 繊維 (宇部興産製) を強化材とした、マトリックス気孔率を 30vol% に制御した SiC 繊維強化ポーラス SiC 複合材料 (ポーラス SiC) を京都大学エネルギー理工学研究所の有するホットプレス装置で作製した。作製したポーラス複合材料及び繊維/マトリックス界面に炭素界面層を施したナノ含浸遷移共晶 (NITE) 法で作製した SiC/SiC (NITE-SiC/SiC、エネテック総研製) を、相対湿度が 80% になるように制御した H₂O-Ar 混合ガスを 300ml/min、1 気圧でフローさせた雰囲気下、室温から 1200°C まで昇温速度 10°C/min、京都大学エネルギー理工学研究所の有する TG-DTA を実施した。また、800、1000、1200°C で 8 時間保持し質量変化から高温水蒸気による酸化速度を算出した。また、物質・材料研究機構の有する XRD による構造解析、FE-SEM による組織変化、脱離ガス分析装置による水素ガス発生分析から過酷事故時における健全性を評価した。比較材として既存の Zr 合金も同様の実験を行った。

3. 結果と考察

図 1 (a) に示す 1200°C までの質量変化 (TG 結果) から Zr 合金は、800°C ぐらいから徐々に質量増加を始め、1000°C を境にして急激な質量増加を示した。Zr 合金は式(1) : $Zr(s)+2H_2O(g) \rightarrow ZrO_2(s)+2H_2(g)$ によって、高温水蒸気との反応により酸化され、水素ガス発生と Zr 酸化物となり質量増加を伴う発熱反応を引き起こすことが知られている。一方ポーラス SiC は 1000°C 付近からの僅かな質量増加を示し、NITE-SiC/SiC は 1000°C 付近から逆に若干の質量減少を示した。これは、試験後の組織観察及び構造解析から SiC 自体は式(2) : $SiC(s)+2H_2O(g) \rightarrow SiO_2(s)+CH_4(g)$ によって、高温水蒸気によって酸化され SiO₂ を形成した為若干の質量増加を示したものと考えられる。NITE-SiC/SiC における若干の質量減少は、繊維とマトリックスとの間にある熱分解炭素界面層の酸化消失および助剤成分の表面への拡散・揮発によるものと推察される。図 1 (b) に示す脱離ガス分析では、Zr 合金が 1000°C 近辺から水素発生が始まり、1100°C 以降急激な水素ガス発生が起こることを明らかにした。一方、ポーラス SiC 及び NITE-SiC/SiC では、Zr 合金と比較し非常に少ない水素ガス発生量であることを確認した。1200°C で 8 時間保持後では、Zr 合金が Zr 酸化物に完全に酸化されてしまう (酸化速度 : >100 μm/h) のに対し、NITE-SiC 材は酸化速度 : ~1 μm/h の酸化を受ける程度であることを確認し、本研究を通して Zr 合金と比較し SiC/SiC の優れた高温水蒸気耐性を実証した。今回得られた結果を元に、応力負荷を加えた複合環境下での高温特性調査を引き続き実施するとともに、運転時における高温水への耐食性や事故時を想定した高温水蒸気耐性を有する SiS/SiC への被覆層のプロセス開発へと発展させる計画である。

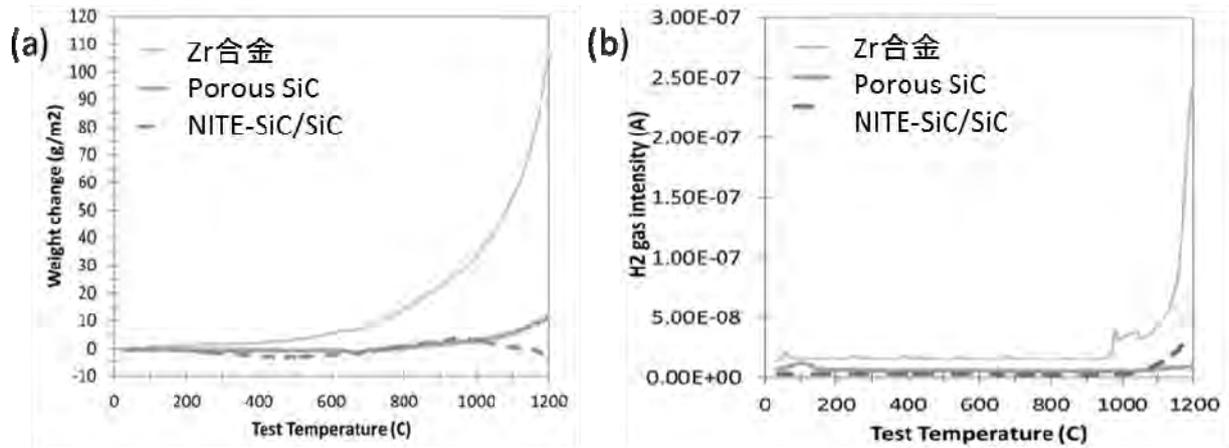


図1 室温から1200°Cまでの高温水蒸気雰囲気下におけるZr合金、ポラスSiC及びNITE-SiC/SiCの(a)質量変化(TG結果)と(b)水素ガス分析結果

4. 本年度 発表リスト

[口頭発表リスト]

- ・ K. Shimoda, M. Lee, T. Hinoki, "Oxidation Resistance of SiC-based Composites Materials in High Temperature Steam Environment," The 5th International Symposium of Advanced Energy Science ~ Contribution to Zero-Emission Energy~, September 30-October 2, 2014, Kyoto University, Japan(ポスター).
- ・ K. Shimoda, T. Hinoki, H. Murakami, "Steam oxidation of SiC-based composites for ATF fuel Cladding," 6th Tsukuba International Coating Symposium (TICS), 4-5 December, 2014 Tsukuba, Japan (招待講演).
- ・ 下田一哉、檜木達也、村上秀之、"SiC基複合材料の高温水蒸気環境における耐酸化性"、日本セラミックス協会2015年年会、2015年3月18-20日、岡山大学。

[論文発表リスト]

- ・ K. Shimoda, T. Hinoki, H. Murakami, "Steam oxidation of SiC-based composites for ATF fuel Cladding," Proceedings of the 6th Tsukuba International Coating Symposium (TICS-2014), (2014) 43-44.

電子サイクロトロン波帯の電磁波を用いた ビート波によるイオン加熱

設楽弘之¹, 長崎百伸²

¹日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景と目的

プラズマの磁場閉じ込め研究におけるイオン加熱は重要な課題である。プラズマ加熱において、MHz帯のイオン加熱用高パワー入射ランチャーは GHz帯の電子加熱用ランチャーに比べ空間的、機械的な制限が大きい。また一般的なイオン加熱用ランチャーによる局所的なイオン加熱は難しい。さらにプラズマに非常に近い位置に設置するためプラズマからの影響も大きく局所的な加熱も難しい。イオン加熱におけるこれらのランチャーの特徴、問題点を改善するために、既存の電子サイクロトロン共鳴加熱 (ECRH) 用のランチャー技術を用いたイオン加熱手法を提案する。

ECRH ランチャーの特徴としてはプラズマから離して設置することができ、かつ要求されるポート面積あたりの加熱効率が大きいことが挙げられる。そして閉じ込め磁場の磁場強度に応じたプラズマ内の EC 共鳴領域において狭い領域に入射パワーを吸収させることができるため局所的な加熱が可能である。これら ECRH ランチャーの特徴を活用し、複数のランチャーを用いビート波を発生させることで新しいイオン加熱手法の可能性を探る。

2. 評価手法

考案した複数のミリ波によるビート波を用いたイオン加熱は既存の技術で実現可能である。有効な加熱条件の明確化を行うため、考案したビート波によるイオン加熱手法に関し、シミュレーション計算を行うための調査研究を行った。

ビート波による粒子加速についての研究は、80年代の田島らのレーザーパルスによるビート波 (リングミュア波) を用いた電子加速における研究 (Tajima et al., "Laser Electron Accelerator", Phys. Rev. Lett. **43**, 267) から始まった。しかし、本研究で対象とするプラズマ中のイオン加速についての研究はほとんどなく、またマイクロ波を用いた実験として数 GHzの非局所化ビームによる研究がごくわずかある程度であった。

ビート波の発生機構についてであるが、本研究における対象パラメータ領域においては、二つの電磁波 (横波) から、縦波である媒質密度の粗密波を生じさせる機構としては以下のものが候補となり、どちらか一つもしくは両方の機構の寄与が考えられる。

- 誘導ブリルアン散乱 (Stimulated Brillouin Scattering / SBS) : あるパワーの閾値を超えた場合の屈折率の変化による音波の励起。
- 非線型光学的混合 (nonlinear optical-mixing) : ポンデロモータイブ力による粒子との非線型ランダウ減衰。

そして2つの電磁波および励起される粗密波は右の分散関係を満たす必要がある。例としてイオン音波の分散関係を示す。閉じ込めプラズマの典型的なパラメータを用いた場合、4GHz程度の値となる。

E_1 : EM wave 1
 E_2 : EM wave 2
 E_p : ElectroStatic wave

$\omega_1 - \omega_2 = \omega_p$
 $k_1 \pm k_2 = k_p$
 where ω_p, k_p satisfies $\epsilon(\omega_p, k_p) = 0$

また、粗密波の振幅は Pawley (Phys. Rev. Lett., 49, 12, 877) らによって導出されたイオンについての流体方程式から求めることができる。

$$\frac{n}{n_0} \approx \frac{e^2 E_1 E_2}{m^2 \omega_1 \omega_2} \frac{m}{2M} k_s^2 \cdot \frac{\exp[-\nu(t-\tau)][1-e^{-\nu\tau}] \cdot \exp[-i(k_s c_s + \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{u}_0)t]}{k_s c_s (i\nu + \Delta\omega - k_s c_s - \mathbf{k}_s \cdot \mathbf{u}_0)}$$

ν : effective ion damping frequency

\mathbf{u}_0 : ion drift velocity

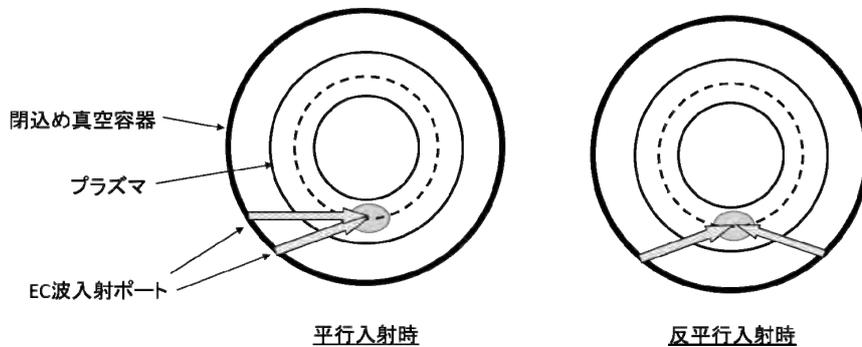
τ : RF pulse duration

$\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$: RF pulse duration

τ : RF pulse duration

$\omega_s (\mathbf{k}_s)$: ion acoustic wave's frequency (wave number)

電磁波発生源としてはミリ波発振源ジャイロトロンを想定しており、相互作用領域で反平行に交差、もしくは平行に交わるような以下に示した 2 つの入射波の入射模擬条件を設定する。それぞれの偏波モードの選択、設定も必要である。



3. まとめと今後の展開

イオン加熱は磁場プラズマ閉込めの研究において重要な課題であり、本研究で提案する ECRH 用のランチャーを応用するイオン加熱、加速用のランチャーの有効性を示すため、計算を進めているところである。今後、本提案による加熱手法の有用性および高効率性を示すうえで以下の計算を進めていく計画である。計算により有用性、高効率性を示すことができたのち、実験的研究により評価を行う必要がある。

- 平行、反平行での入射条件、
- CW、パルス波での効率の違い
- 周波数依存性、
- 2 入射波の偏波設定、
- 2 入射波のパワー比設定
- ビート波への変換効率、イオンへの運動量の輸送効率

単一電子ビーム照射技術開発による微視的トラック構造研究

魚住裕介¹, モハマドリズワン², 松尾和輝², 米重成英²,

大垣英明³, 紀井俊輝³, 全 炳俊³

¹九州大学大学院工学研究院

²九州大学大学院工学府

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

電子ビームやイオンビームは、医療をはじめとする様々な産業・応用分野において照射用として使用されている。照射計画を高度化するためには、電子から物質へエネルギーが移行する素過程を解明し定量化しなければならない。この際、一次電子の飛跡に沿って発生する二次電子の空間密度分布およびエネルギー分布を表す微視的トラック構造の理解が不可欠となる。トラック構造の研究では、単一電子照射下での実時間測定が有力な方法である。しかし、現在の電子加速器では単一電子取り出しは困難であり、ビーム電流を通常の強度よりも10桁程度弱め、電子1個1個を個別に操作するための技術を開発する必要がある。

本研究では、大強度電子加速器を用いて、単一電子の生成と制御をエネルギー・位置に関して精確に行うための技術要素開発を行う。また、超高速結晶検出器を用いた電子計測技術を開拓する。本研究の結果単一電子照射技術が実用化されると、電子による付与エネルギー測定が可能になるため、トラック構造の微視的研究が可能となる。さらに、電子相互作用の素過程研究の可能性が大きく広がり、機能性材料の開発や生命科学の分野で新しい展開が期待される。

2. 方法

本研究では、エネルギー複合機構研究センター・自由電子レーザー発生用電子加速器 KU-FEL を用いて実験を行った。実験の体系は、図1に示している。電子は高周波電子銃で8.2 MeVまで加速した後加速管まで導く。10 MeV以上の電子を照射する場合は、加速管でさらに38 MeVまで加速し。前年度までは、ビーム強度を下げるために散乱体を図中Aの位置に挿入し、さらに磁石でデフォーカスし

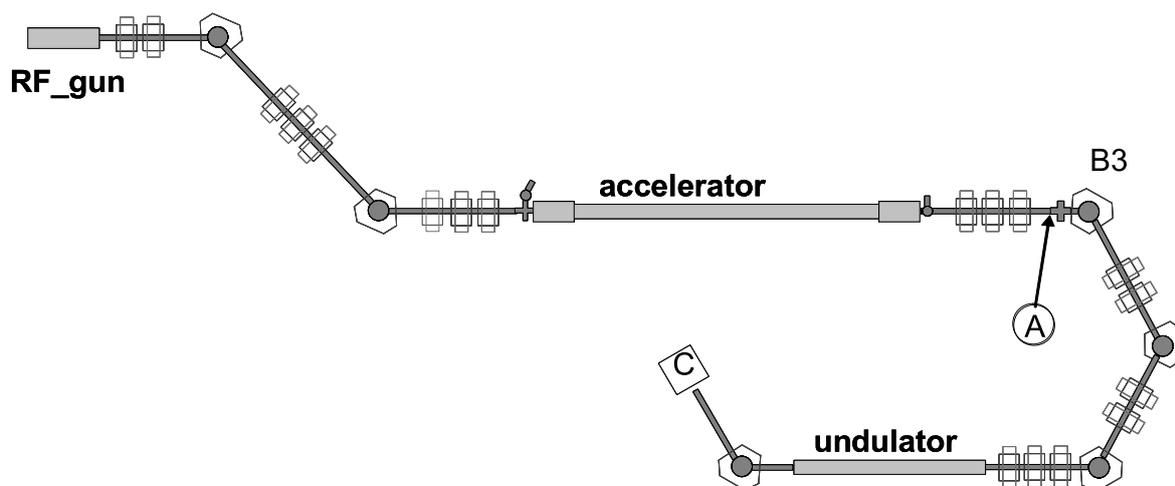


図1 実験装置

てビームを散らしたが、今年度は前述の散乱体を使用せず、熱陰極高周波電子銃の熱陰極温度を下げる事で電子銃から発生する電子の量を極力減らすことにより単一電子照射条件を実現した。また、加速管後の電子エネルギーは加速管に投入する高周波電力の強度・位相を制御することにより調整した。B3 電磁石の前後にはコリメータを置いて、ビームをカットした。C の位置には PWO シンチレータに光電子増倍管を取付けた検出器を置いて、電子エネルギーの計測を行った。PWO シンチレータは大きさ $40 \times 40 \times 50$ mm で、光電子増倍管からの信号はオシロスコープで読み取った。検出器一式は、鉛ブロックとパラフィンブロックで作った嚴重な遮へい体の中に置いた。

3. 結果とまとめ

電子エネルギーと PWO シンチレータ出力波高の結果を図 2 に示している。これは、シンチレータ出力をオシロスコープで観測した結果を解析したものである。電子線に対する波形は、ビームのマクロ構造全体の中で大きな電子ノイズの後、変動するベースライン上に中性子線、X 線の信号と共に見られる。PWO シンチレータの応答が極めて早いため、ビームのマクロバンチ中の複数の信号が無干渉に観測出来ている。測定した 10MeV から 30MeV までのエネルギー範囲で良い直線性を見ることが出来る。図 3 は PWO シンチレータからの波高スペクトルを、EGS5 コードによるシミュレーション結果と比較したものである。シミュレーションは検出器のエネルギー分解能を考慮していないため、最大波高周辺が過小に評価する結果となっている。シミュレーションの分析から、10MeV 以下の部分は電子がビーム取出し窓や空気と反応した結果生じるガンマ線の寄与であることが確認できた。

今年度は熱陰極高周波電子銃から発生させる電子の量を極力減らすことにより単一電子ビーム生成を行った結果、バックグラウンドを大きく減らすことに成功した。このため、従来必須であった遮へい体を取り外しての測定が可能であることを確認した。

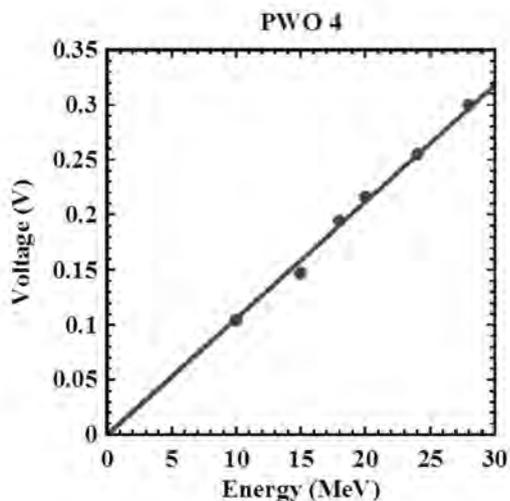


図 2 波高値の電子エネルギー依存性

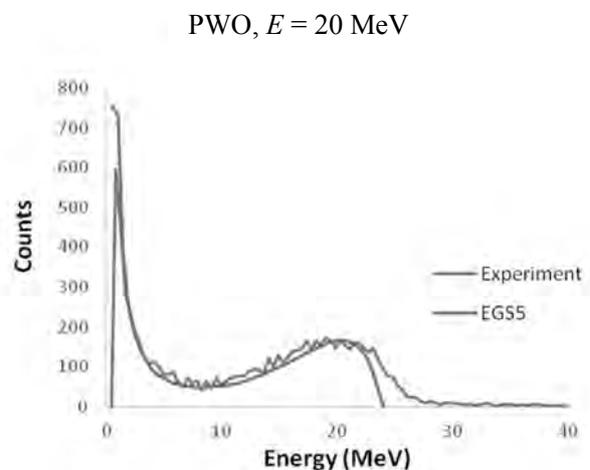


図 3 波高分布とシミュレーションの比較

[口頭発表リスト]

Scintillation of lead tungstate crystal studied with single-electron beam from KUFEL, M. Rizwan, Y. Uozumi, K. Matsuo, H. Ohgaki, T. Kii, H. Zen, Z. Tsamalaidze, P. Evtoukhovitch, V. Samoilov, Nuclear Science, Technology & Engineering Conference 2014, Nov. 11-14, 2014, Universiti Teknologi, Malaysia (Poster).

新規エネルギー変換に向けた原子層材料の 基礎物性の解明

小鍋哲¹, 岡田 晋¹, 山本貴博², 松田一成³

¹筑波大学数理物質系

²東京理科大学工学部

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景

エネルギー枯渇や地球温暖化などの環境問題を克服し、持続可能かつクリーンな社会の実現のためには、自然エネルギーや再生可能エネルギーの自給率向上が必要不可欠である。具体的な手段として、枯渇燃料の代替エネルギー源開拓やスマートテクノロジーとしてのエネルギーハーベスト技術の開発などがあるが、そのためには熱や光などの異なる形態の様々なエネルギー源を利用することとその高効率化が重要になる。しかし、代替エネルギーとして期待されている太陽光発電においては、既存の光電変換プロセスに基づく限り発電効率に理論的上限值(ショックレー・クワイサー限界)が存在することが知られている。一方、エネルギーハーベスト技術として代表的なものに熱電変換による発電があるが、重元素を用いていることやその発電変換効率が非常に小さいことから、極めて限られた状況を除いて実用化には至っていない。このようなエネルギー生成手段の原理的な困難を乗り越えるためには、基礎科学を規範として、これまでにない全く新しいエネルギー生成機構とそれらを実現する新奇材料を見出すことが強く望まれる。そこで、本研究では、低次元ナノ物質で顕在化する量子効果を積極的に活用した新奇なエネルギー変換プロセスの物理機構の解明を目的とし、特に近年注目されている原子層材料の遷移金属ダイカルコゲナイドについて光物性と熱電物性を調べた。以下、本研究で得られた遷移金属ダイカルコゲナイドの強い非線形光学応答と新奇な熱電物性に関する結果を示す。

2. 遷移金属ダイカルコゲナイドにおける非線形光学応答

単層遷移金属ダイカルコゲナイドは、照射光の偏光特性を利用し、バレー自由度を制御できることが知られている。図1は遷移金属ダイカルコゲナイドの一つである二硫化モリブデンの吸収スペクトルの計算結果を示しているが、我々の計算でも実験で観測されているバレー選択則を再現していることがわかる。これにより、我々の理論的アプローチが遷移金属ダイカルコゲナイドの光励起状態を正しく記述できていることが確認できた。次に、この手法で得られた励起子状態を用いることで、励起子散乱プロセスを計算し、非線形光学応答について調べた。その結果、バルク材料と異なり、励起子緩和率が非常に大きいことがわかった。例えば、 MoS_2 のアージュ係数は $0.28 \text{ cm}^2/\text{sec}$ に達する。これは原子層材料特有の低次元性と遮蔽効果が弱いことに起因し、励起子間クーロン相互作用が増大していることによる。本研究で得られた計算結果は、実験の測定結果とよく一致しており、遷移金属ダイカルコゲナイドでは、強い非線形光学応答が生じることが明らかになった。光電変換プロセスでは、光励起状態やそのダイナミクスの解明が必要不可欠であるが、ここで得られた強い非線形性は原子層材料の光励起状態の特異性を示しており、光電変換デバイスに応用する上でも非常に重要な知見となる。

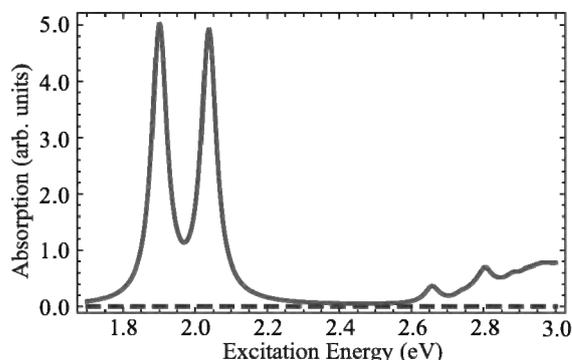


図1 MoS_2 の吸収スペクトル。赤(実線)、青(破線)はそれぞれ K、K' 点での吸収を表す。

3. 遷移金属ダイカルコゲナイドにおける新奇な熱電効果

単層遷移金属ダイカルコゲナイドは、上記のような偏光照射によるバレー選択性だけでなく、強いスピン軌道相互作用や巨大ゼーベック係数などの興味深い物性を有することが知られている。遷移金属ダイカルコゲナイドの結晶構造は空間反転対称性が破れているため、ブリルアンゾーンのK点とK'点の各バレーで大きさは同じだが符号の異なるバレー曲率が生じる。その結果、K点(K'点)近傍の電子はバレー曲率による有効磁場を感じ、異常ホール効果を示す。実際、この現象に起因したバレーホール効果が実験的に観測されている。このような多様な性質が熱電特性に与える影響を半古典理論に基づき調べた。遷移金属ダイカルコゲナイドに温度勾配をつくり、円偏光によりキャリアを生成する(図2)。このセットアップのもとで、熱電係数を計算した。その結果、図3に示すように、遷移金属ダイカルコゲナイドに特徴的な偏光照射下のバレー選択性と強いスピン軌道相互作用に加え、バレー曲率が存在することで、外部磁場や磁化が存在しないにも関わらず、温度勾配に対して垂直方向に電位差が生じることが明らかになった(異常ネルンスト効果)。この結果は、既存の材料では生じ得ない熱電効果であり、新たな熱電変換デバイスへの応用が期待される。

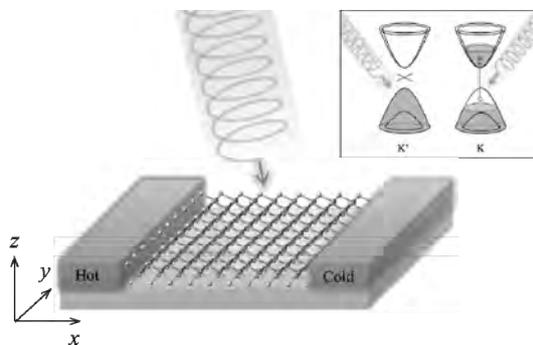


図2 熱電係数を計算する際のセットアップ。遷移金属ダイカルコゲナイドに温度勾配を与え、円偏光を照射する。

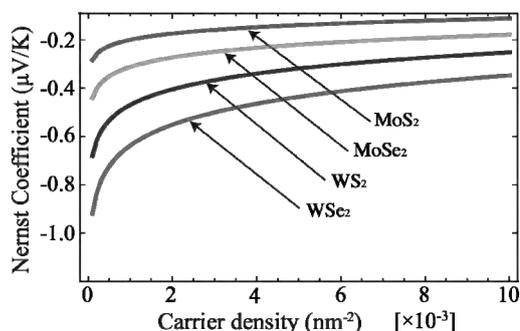


図3 ネルンスト係数のキャリア密度依存性。MoS₂, MoSe₂, WS₂, WSe₂についての計算結果を示している。

4. 本年度の研究業績

[口頭発表リスト]

小鍋哲, 岡田晋, 「遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレー分極緩和の理論的研究」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7 日, 中部大学.

小鍋哲, 山本貴博, 「遷移金属ダイカルコゲナイドにおけるバレーネルンスト効果」, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 7 日, 中部大学.

毛利真一郎, 周利中, 壺井佑夏, Minglin Toh, 宮内雄平, 小鍋哲, 岡田晋, 江田剛輝, 松田一成, 「単層遷移金属ダイカルコゲナイドにおける発光ダイナミクスと励起子 励起子相互作用」, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 29 日, 東海大学.

[論文発表リスト]

S. Konabe and S. Okada, “Effect of Coulomb interactions on optical properties of monolayer transition metal dichalcogenides”, *Physical Review B* **90** 155304 (2014) (発行済).

S. Konabe and T. Yamamoto, “Valley photothermoelectric effects in transition metal dichalcogenides”, *Physical Review B* **90** 075430 (2014) (発行済).

高温プラズマでの乱流計測のための 多チャンネル分光計測システムの開発

藤澤彰英¹, 大島慎介², 永島芳彦¹, 佐々木真¹, 長崎百伸², 小林伸二², 山本 聡²

¹九州大学・応用力学研究所

²京都大学・エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

近年、プラズマ中の乱流や種々の構造を解明を目的として、プローブ・ECE・反射計測などを用いた多点計測による可視化法が急速に発展している。プラズマ中の揺動の時空間構造の観測によって、プラズマ乱流物理の理解は飛躍的に進展している。本研究では、トモグラフィー法に基礎を置くプラズマ全域にわたる空間分解能の極めて高い、多波長(X線、紫外光、可視光)超多点観測による構造可視化を実現し、これによってプラズマ乱流におけるマルチスケール相互作用を直接観測する計測法の実現を目指してきた。

これまで、X線及び紫外線観測器の共通部分である可視光観測器の試作品(2次元、45ch)を開発し、九州大学の直線型装置PANTAにおいて試験的に運用してきたが、より高温・高密度プラズマを生成することが可能な京都大学エネルギー理工学研究所が有する高温プラズマ生成装置において上記分光計測システムの開発を進める。高温高密度プラズマでは、より強い信号強度が得られることが期待され、乱流計測のための基礎項目(S/N比、対雑音性能など)の評価や、Time Delay Estimate(TDE)法によるプラズマ流速測定の実験検証などが可能である。本研究によって、将来的に新しいプラズマ乱流可視化手法の確立と、プラズマ乱流物理の新たな展開がもたらされることが期待される。H26年度においては、試験的に紫外光、および可視領域のH α 光を通過するフィルタを用いた9ch計測器の設置を行い、計測を試みた。

2. 多チャンネル分光計測システムの試験計測器の構築と計測結果

多波長多点検出システムは、可視、紫外、X線等、プラズマからの発光領域に対応した波長の異なる光を検出することで、対応するプラズマ領域の揺らぎや構造変化を捉えることが出来る。図1に試験的に構築した計測システムの概要を示す。真空容器内部に位置する検出器要素は、コリメータ、紫外フィルタ、そしてフランジに埋め込まれた蛍光ガラスである。プラズマからの発光をコリメータを通じて検出することで観測方向・領域を制約する。このコリメータは、2mm ϕ x 100mmの金属パイプである。コリメータ後部に、可視光、或いは紫外光のフィルタが挿入され、今回は紫外光フィルタ及びH α 光透過するフィルタを選択した。紫外光は、真空フランジに埋め込まれた蛍光ガラスを用いて紫外から可視光へと変換する。蛍光ガラスは住田光学ガラス製のルミラスーG9を用いた。ICF 114フランジを貫通する3x3の9点の蛍光ガラスが取り付けられており、変換された可視光は光ファイバによって伝送の後、本体装置から十分離れた場所で電気信号

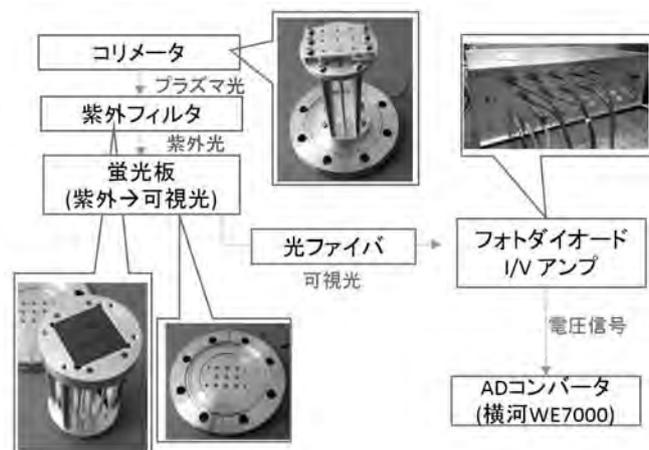


図1. 多チャンネル分光計測システムの構成

変換を行う。このため、本体装置自身、あるいは周辺の様々な加熱機器や計測器に起因する電磁氣的ノイズへの耐性も優れている。この計測器は RFP 装置である RELAX 装置においても試験的に運用され、実際に紫外光の検出に成功している。

ヘリオトロン J 装置における実験において得られた計測器信号を図 2 に示す。NBI 単独加熱によって維持されたプラズマに対し、超音速分子ビーム (SMBI) による粒子供給によって生成された高密度プラズマにおいて計測を試みた。図 2 に実験条件、および計測信号を示す。図 2 (上) は、マイクロ波干渉計によって計測された線平均密度と加熱条件を示している。電子密度 $0.8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ のプラズマに対する SMBI の入射によって $2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 近い倍以上の密度が生成されていることが認められる。図 2 (中)、及び図 2 (下) に本計測器で観測された信号を示す。プラズマ放電に伴う $\text{H}\alpha$ 光の信号の応答が認められ、特に ECH 入射開始直後のプラズマ生成時、および SMBI 入射による急激な $\text{H}\alpha$ 光の上昇は明確である。これは、既設の $\text{H}\alpha$ 光計測信号とほぼ同様の波形を示している。しかしながら紫外光の信号に関しては明確な応答は観測されておらず、光量が十分でなかった可能性がある。尚、ファイバによる光信号伝送の狙い通り、本体磁場立ち上げによる電磁ノイズ、あるいは加熱機器などのノイズも混入されず、本システム構成の有効性については確認できたと言える。

$\text{H}\alpha$ 信号に関して隣接した観測チャンネルのパワースペクトル及び両者のコヒーレンスについて図 3 に示す。両チャンネルはほぼ同様のスペクトルを示しているが、全域でコヒーレンスが低い。この場合、2 点間の相関があることを前提とする 2 点相関法による波数スペクトルの評価や揺動の伝搬遅れから揺動速度を評価する TDE 法等の適用は難しい。原因としては、光量不足によって SN 比が十分でないことや、観測視線の線積分効果、あるいは隣接チャンネル間の距離が離れすぎていることなどが考えられるが、慎重に検討を進める必要がある。

今後はフィルタの変更、コリメータ径の変更、蛍光ガラスのサイズ変更など、信号強度を増加させるための変更を進める予定である。

[発表リスト]

A.Fujisawa et al., "Development of Multi Channel Spectroscopy System for Turbulence Measurement in High Temperature Plasmas", 30 Sep.- 2.Oct.2014, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, Uji, Kyoto, poster presentation

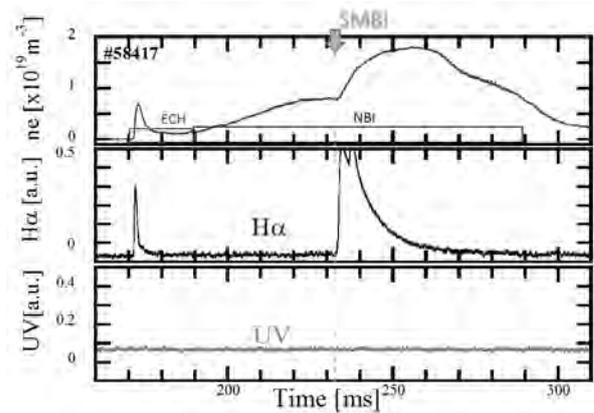


図 2. (上) 放電条件と線平均密度、(中) $\text{H}\alpha$ 光信号、(下) 紫外光信号。

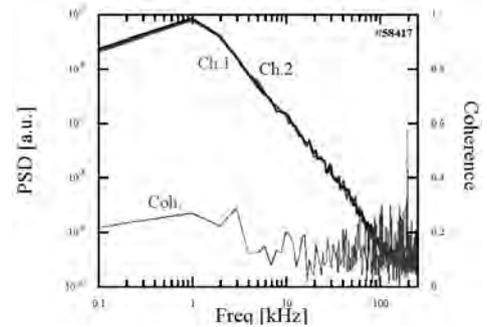


図 3. 隣接チャンネルの $\text{H}\alpha$ 信号のパワースペクトルと両者のコヒーレンス

照射下材料ミクロ構造変化の照射場依存性に関する モデリング・シミュレーション

渡辺淑之¹, 森下和功², 中筋俊樹³

¹日本原子力研究開発機構核融合研究開発部門

²京都大学エネルギー理工学研究所

³京都大学大学院エネルギー科学研究科

1. 目的

核融合原型炉の寿命評価を照射効果を踏まえて精度良く行うためには、既存の代替照射場（材料試験炉やイオン加速器）で取得した材料照射データを核融合環境下でのデータへ理論的に外挿するための方法論の開発が必要である。そのためには、照射による材料の振る舞い（照射下材料挙動）をその時間的・空間的マルチスケール性を十分に踏まえて記述すると共に、計算機シミュレーションを用いて、互いに異なる照射場での材料挙動の関係を物理的に正しく解釈しておくことが不可欠となる。本研究では、低放射化フェライト鋼（RAFM）のラスマルテンサイト組織を対象とし、その照射下ミクロ構造変化（欠陥集合体形成）におけるヘリウム効果を理論的に明らかにするための基盤技術の開発を目的とする。

2. 手法

RAFM 中の代表的な欠陥集合体である転位ループ（自己格子間原子（SIA）集合体）及びヘリウムバブル（ヘリウム・空孔集合体）を対象とし、欠陥集合体形成におけるヘリウム効果を理論的に評価した。具体的には、まず、分子動力学計算結果を連続体スケールへと拡張し、欠陥集合体の熱的安定性（点欠陥結合エネルギー）を集合体のサイズ・組成比の関数として導出した。続いて、導出した欠陥エネルギー情報を反映した集合体核生成モデルを構築し、各種欠陥濃度の時間変化式を記述した。温度 $T=450^{\circ}\text{C}$ 、原子はじき出し損傷速度（dpa レート） $P_V=10^6$ dpa/s のもと、ヘリウム生成速度 $P_{\text{He}}=0, 10^7, 10^5$ appmHe/s の 3 条件について解析を実施した。尚、転位ループの核生成については母相中の SIA の拡散が顕著となり始める時間スケール（ $\sim 10^6$ s）、バブルについては空孔の拡散が顕著となり始める時間スケール（ ~ 100 s）にそれぞれ着目し、欠陥集合体形成へのヘリウムの影響を調べた。

3. 結果・考察

図 1 は、反応速度論計算より得られた転位ループの数密度およびサイズの照射量依存性をプロットしたものである。ループ数密度は照射量とともに増加した後、飽和傾向を示す。また、数密度の飽和とともにサイズが著しく増加している。これは、支配的な現象が核生成プロセスから成長プロセスへ移行するためであり、通常の方法照射実験の結果と同様の傾向を示している。しかしながら、いずれの P_{He} においても、ループ数密度の照射量依存性に有意な差は見られない。つまり、ループの核生成におけるヘリウム効果は非常に小さいことを示唆している。これは、ループが本質的に高い熱的安定性を有していることに加えて、母相中の空孔と SIA の濃度の変動がヘリウムの存在に依存しないことに起因している。ループの核生成が顕著となる時間スケールでは、ヘリウムは空孔に捕獲され、空孔の動きを抑制する。しかしながら、空孔は SIA と再結合してヘリウムを母相中へ再放出するため、結果的に、ループに対する空孔・SIA の流入速度がヘリウムの有無に依存しない状態となる。

同様に、ヘリウムバブル形成におけるヘリウム効果について調べた。図 2 は、計算より得られたバブルの数密度およびサイズの照射量依存性をプロットしたものである。尚、 $P_{\text{He}}=0$ appmHe/s でのバブルはボイド（ヘリウムなしのバブル）と定義する。転位ループとは対照的に、 $P_{\text{He}}=10^7, 10^5$ appmHe/s

では多くのバブルが形成（バブルの核生成が促進）されている。これは、ポイドに捕獲されたヘリウムが、バブルからの空孔流出を抑制することでポイドの熱的安定性が向上し、結果的に、ポイド核生成が促進されるためである。尚、この促進効果は少量のヘリウム（バブル中に数個程度）でも十分に実効的であることが示唆された。また、今回の計算条件では、バブルは空孔拡散律速で成長する（バブルに対する空孔の流入速度が、ヘリウムのそれよりも数桁高い）ため、 $P_{\text{He}}=10^{-7}, 10^{-5}$ の両者でのバブル核生成には有意な差が見られない。

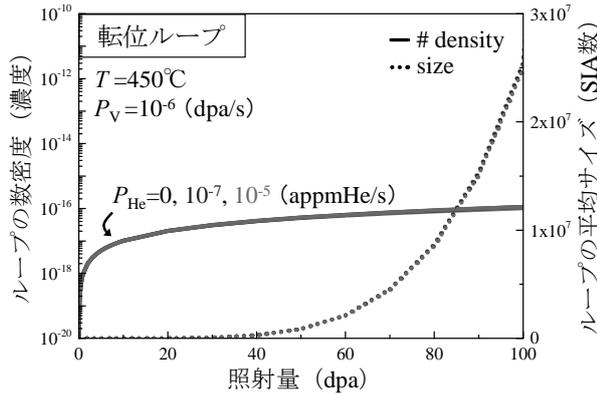


図1 転位ループの数密度・サイズの照射量依存性

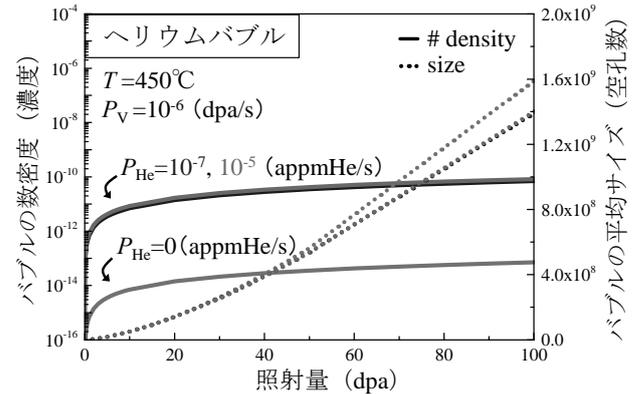


図2 ヘリウムバブルの数密度・サイズの照射量依存性

4. まとめ

RAFM における照射下欠陥集合体形成を対象とし、集合体の臨界核を欠陥エネルギー論に基づいて定義することで、幅広い照射環境下での核生成・成長を追跡可能な反応速度論モデルを構築した。また、転位ループ及びヘリウムバブル形成におけるヘリウム効果の基礎的知見を獲得した。今後は、欠陥集合体形成挙動の照射パラメータ依存性の系統的評価が必要となる。

[口頭発表リスト]

- Y. Watanabe, K. Morishita, Y. Yamamoto, T. Nakasuji, D. Hamaguchi, M. Ando, H. Tanigawa, "Irradiation condition dependence of microstructural change in RAFM steel", 12th Computer Simulation of Radiation Effects in Solids (COSIRES-12), Jun 8-13, 2014, Alicante, Spain (ポスター)
- 渡辺淑之, 森下和功, 山本泰功, 中筋俊樹, 濱口大, 安堂正己, 谷川博康, 「材料ミクロ構造変化の照射条件依存性に関する数値解析」, 第10回核融合エネルギー連合講演会, 2014年6月19-20日, つくば国際会議場 (ポスター)

[論文発表リスト]

Y. Watanabe, K. Morishita, T. Nakasuji, M. Ando, H. Tanigawa, "Helium effects on microstructural change in RAFM steel under irradiation: Reaction rate theory modeling", Nucl. Instrum. Meth. B, *in press*.

先進 SiC/SiC 複合材料の形状安定性・微細組織に 及ぼす照射温度依存性

小沢和巳¹, 近藤創介², 黒滝宏紀¹, 橋富興宣², 檜木達也², 野澤貴史¹, 谷川博康¹

¹ 日本原子力研究開発機構 核融合炉構造材料開発グループ

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景・目的

先進 SiC/SiC 複合材料は、優れた高温強度特性や耐照射特性等の様々な利点を有することから、核融合炉 DEMO 炉候補材料として研究開発が進められている。高結晶性かつ近化学量論組成の先進 SiC 繊維と、同じく高結晶性を有する β -SiC マトリックスを用いた複合材料は、照射下でも同様な要素スウェリング挙動を示すことから優れた耐照射強度特性を示していた。しかしながら、近年、高線量 (~70 dpa) 領域においては繊維劣化に起因する最大強度低下が得られたことから [1]、昨年度では、照射に強いとされていた先進 SiC 繊維に対して高線量イオン照射を行った。その結果、先進 SiC 繊維の中でも Hi-Nicalon™ Type-S (以下、HNLS) 繊維の顕著な収縮が明らかとなっている。本年度では、同繊維の形状安定性に及ぼす照射温度依存性を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

HNLS 繊維で強化され、SiC/PyC 多層被覆界面構造 ((SiC/PyC) の 5 層構造で最も内側の炭素界面相厚さが 50 nm 程度) を有する、一方向強化 SiC/SiC モデル複合材料 (米国 HyperTherm (現 Rolls-Royce) 社製) を表面研磨し、照射に供した。照射実験は、京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センターの DuET 照射施設にて実施された。弾き出し損傷は 5.1 MeV Si^{2+} イオンにて模擬し (シングルイオン照射)、照射温度を 600°C、損傷量を 20, 100 dpa (試料表面深さから 1230 nm における公称値) とした。照射後、原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて SiC 繊維・SiC マトリックス部分の段差部分から寸法変化を測定するとともに、繊維組織を断面 TEM 観察にて評価した。Kondo らが実施した 300°C, 100 dpa イオン照射結果 [2] と比較した。

3. 結果および考察

AFM による段差測定結果から見積もられた各照射条件における化学気相浸透 (CVI) -SiC マトリックスと HNLS 繊維のスウェリングを図 1 に示す。この際、CVI-SiC のスウェリングは既報告の化学気相蒸着 (CVD) -SiC のスウェリング [3] と一致すると仮定して求めた。段差測定の結果からは、300°C, 100 dpa で 1.6% と顕著な収縮を示す一方で、600°C においては、20 dpa では 0.24%、100 dpa では 0.6% の収縮であり、600°C における収縮の線量依存性と、100 dpa における負の温度依存性が明らかとなった。

600°C で照射した HNLS 繊維の低倍・高倍の断面 TEM 観察像結果を図 2 に示す。非照射の HNLS 繊維においては、粒界三重点上にプロセス由来の余剰炭素 (カーボン: C) パケットならびに粒界上に C リボンが残留しており、300°C, 100 dpa 照射の結果 [2] からは、それらカーボン相の減少・消失傾向にあることが認められている。600°C における照射においても非照射状態において存在していたカーボンパケット (TEM 像における白いコントラストに対応) と非晶質相 (結晶粒の極めて小さい SiC の周辺に存在) が、損傷量が増大するにつれ減少あるいは消失する

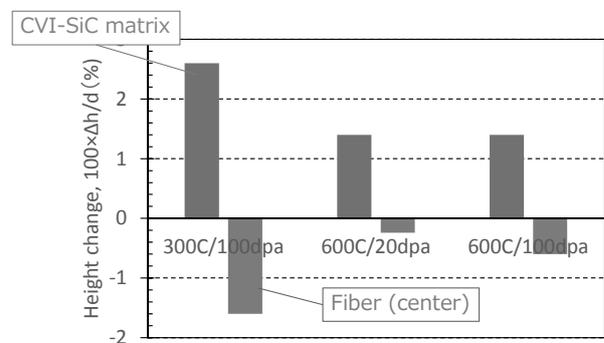


図1 300, 600°C における CVI-SiC マトリックスと HNLS 繊維の段差測定から見積もられたスウェリング。

傾向が確認できた。

また、300°C、100 dpa 照射後の HNLS 繊維中の SiC 結晶粒内においては、電子エネルギー損失分光 (EELS) 法により、C-K edge で 1S から π^* へのピークシフトが認められている [2]。これは同繊維 SiC 粒内において照射により C-C 結合が増加したことを示唆するものである。照射によるカスケードミキシングにより、大量の C 及び Si 空孔が形成されるが、C 格子間原子を除き易動度は高くない [5]。唯一、形成エネルギーが負の値を取る Si の空孔に C 格子間原子が入ったアンチサイトのみが最も容易に形成され得る [4]。このアンチサイトの形成は EELS のピークシフトの傾向と一致するものである。また、このアンチサイトは負の体積膨張に寄与することが第一原理計算より明らかとなっている [4]。

以上のことから、両相に存在していた剰余 C が照射により C 格子間原子として SiC 結晶粒内に拡散することにより、収縮を生じたことが最も高い可能性として示唆される。また、600°C 照射材については、C 以外にも Si 格子間原子の易動度が高くなり始めることから [5]、Si 格子間原子-空孔の再結合が促進されたり、他の照射欠陥を形成することで、収縮が 300°C よりも低くなったものと考えられる。

4. 本年度 発表リスト

- [口頭発表リスト] K. Ozawa, H. Kurotaki, T. Nozawa, H. Tanigawa, “TEM characterization of advanced SiC fibers irradiated to high dose at relatively low temperature,” 39th International Conference and Exposition on Advanced Ceramics and Composites (ICACC-39), Daytona Beach, Florida, USA, January 25-30, 2015.
- [論文発表リスト] S. Kondo, T. Hinoki, M. Nonaka, K. Ozawa, “Irradiation-induced shrinkage of highly crystalline SiC fibers,” Acta Materialia, 83 (2015) 1-9. (発行済)

参考文献

- [1] T. Nozawa, et al., Semi-annual progress reports for periods ending Dec 31, 2011, DOE/ER-0313/51 (2011) 33.
- [2] S. Kondo, T. Hinoki, M. Nonaka, K. Ozawa, Acta Mater. 83 (2015) 1-9.
- [3] Y. Katoh, H. Kishimoto, A. Kohyama, J. Nucl. Mater. 307-311 (2002) 1221-1226.
- [4] J. Li, L. Porter, S. Yip, J. Nucl. Mater. 255 (1998) 139-152.
- [5] H. Huang, N. Ghoniem, J. Wong, M. Baskes, Model. Simul. Mater. Sci. Eng. 3 (1995) 615-627.

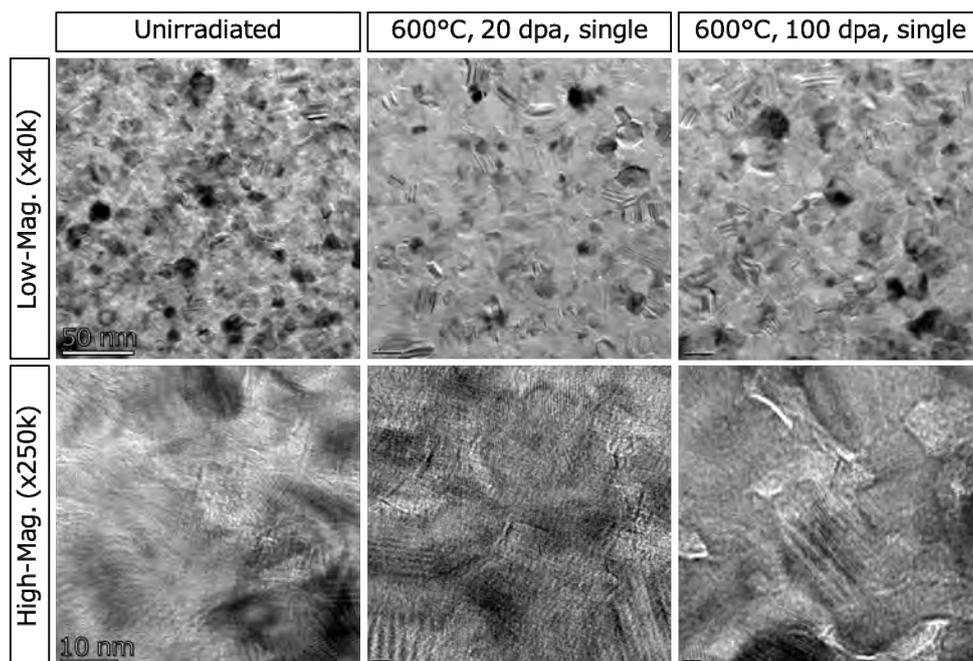


図2 600°C でイオン照射した HNLS 繊維の TEM 観察像。

真空紫外パルスの位相計測と電子状態制御

板倉隆二¹, 中嶋 隆²

¹日本原子力研究開発機構・関西光科学研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 序

レーザーは、核燃料サイクルにおける同位体および元素の分離や廃炉処置における切断作業などにおいて、2次汚染物を出さないという重要な特徴を持ち、今後、大きな役割を担う必要がある。同様に、レーザーを用いたモニタリング技術も、今後、発展させなければならない。本研究では、上記のような応用利用の背景にある物質の物性や化学反応において、根本的な役割を果たす電子の状態に着目する。電子が物質中で感じるクーロン場より大きな電場を高強度レーザーによって瞬時的、しかも任意の波形で作り出すことができれば、電子が制御可能になると期待される。近年、自由電子レーザーや高次高調波によりフェムト～アト秒パルス幅を持つ真空紫外(VUV)領域の短波長光源の開発が進んでいるが、現状では、実際にそれらを利用できるのは、一部の研究機関に限られており、多くの研究者が自分の研究室で使える簡便な方法が求められている。本研究は、真空紫外パルスの波形を計測する新しい手法を開発するとともに、強レーザー場中における電子状態の変化について調べ、その制御法の開発を目指している。我々は、これまで、主に原子の励起状態を経由したイオン化を使った VUV 波形計測法の開発を進めてきたが、本年度、高強度レーザーによって誘起されるプラズマミラーが非常に有力な光スイッチングとして利用できることを見出した。

2. 真空紫外パルスの波形計測法の開発

VUV パルスは、数 mJ レベルのフェムト秒レーザーパルスを希ガスなどの媒質に集光することによって、高次高調波として簡単に得られる一方、パルス幅や位相も含めた波形評価は容易ではない。大きな要因は、VUV 領域から短波長側では、適切な非線形媒質が存在しないことにある。本研究は、高強度フェムト秒レーザーパルスによって生成されたプラズマミラーが VUV 領域において超高速光スイッチとして利用できることを示し、VUV パルスの周波数分解光ゲート (FROG) 測定が可能であることを実証した。

チタンサファイア増幅器からの出力基本波パルス ($\lambda \sim 795$ nm, $\Delta t = 60$ fs) を、Ar セル中に集光し、高次高調波を発生させた。基本波と発生した VUV パルス (5 次高調波、 $\lambda \sim 160$ nm) は、LiF レンズ ($f = 1$ m) によってコリメーションされ、真空チャンバーに導入された。VUV パルスは誘電体多層膜ミラー (160nm 反射, 795 nm 透過) によって基本波

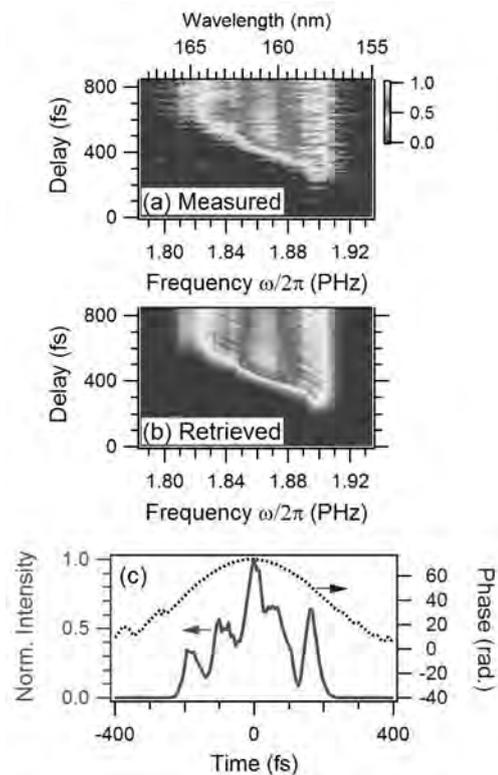


図 1. (a) プラズマミラーによる FROG 実測波形. (b) 再構築された FROG 波形. (c) FROG 波形の再構築により得られた VUV パルス波形

と分離され、遅延回路を経て、再び多層膜ミラーによって共軸に合流させた。基本波および VUV パルスは熔融石英上に集光され、そこから反射された VUV パルスを VUV 分光器に入射し、反射スペクトルが測定された。アブレーション閾値をわずかに超えた強度の基本波を集光された熔融石英上にはプラズマが生成し、VUV の反射率が增大する。熔融石英の照射面は、レーザーショット毎に新しくなるように動かした。基本波と VUV パルスの遅延時間 τ を変えながら測定した反射スペクトルは、図 1(a) のようになり、まさに FROG 波形が得られた。FROG 解析に関して、Plasma mirror の応答がゲート型の関数ではなく、ステップ型の関数であることに注意が必要である。FROG 解析における高効率なアルゴリズムである Principal Component Generalized Projections Algorithm に、上の注意点を考慮した修正を加え、FROG 波形の再構築を行い、図 1(b) のような結果が得られた。得られた VUV パルス波形 [図 1(c)] は、LiF レンズの透過による正チャープを有していることが示された。

今回、開発されたプラズマミラーを用いた FROG 法は、以下の特徴を有している。(1) 反射を用いた手法のため非線形結晶といった透過媒質が不要であり、短波長域への拡張が可能である。拡張範囲は励起できるプラズマ電子密度で決まる。(2) 測定が光電子ではなく、VUV 光を直接分光し、観測するためエネルギー分解能が高く、ピコ秒オーダーの長いパルスや複雑な位相を持つ波形の計測が可能である。(3) プラズマミラーの時間分解反射率変化もモデル関数を必要とせず、FROG の解析を通して求められる。(4) レーザーの絶対位相の安定化や 2 光子過程を起こすほど強い VUV パルス強度を必要としない簡便な方法である。

[口頭発表リスト]

- i) M. Nakano, T. Otobe, and R. Itakura, “Branching into two spin-orbit levels in ionization of rare gases induced by intense UV laser fields”, 30th Symposium on Chemical Kinetics and Dynamics, 4-6 Jun 2014, 姫路, (ポスター)
- ii) 中野元善、乙部智仁、板倉隆二、“紫外レーザー場中Kr原子の多光子イオン化における光電子角度分布の特異的な強度依存性”、レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会、2014年1月11-12 日、東海大学高輪キャンパス
- iii) 板倉隆二、熊田高之、中野元善、赤木 浩、“プラズマミラーを用いた周波数分解光ゲート法による真空紫外波形計測”、第62回応用物理学会春季学術講演会、2014年3月11-14日、東海大学湘南キャンパス

[論文発表リスト]

R. Itakura, T. Kumada, M. Nakano, and H. Akagi, “Frequency-resolved optical gating for characterization of VUV pulses using ultrafast plasma mirror switching”, Opt. Express 投稿中

負三角度トカマクとヘリカルの比較研究

菊池 満¹, S. Medvedev², 長崎百伸³, 佐野史道³, 水内 亨³,

中村祐司³, 渡邊清政⁴, 滝塚知典⁵, 古川 勝⁶

¹原子力機構, ²Keldysh Institute of Applied Mathematics, ³京都大学, ⁴NIFS, ⁵大阪大学, ⁶鳥取大学

1. 負三角度トカマク配位

著者等は、トカマク核融合炉の除熱性能の大幅な改善の可能性を持つ配位として負三角度トカマク配位の実現性の検討を進めている[1],[2],[3],[4],[5],[6]。本配位は、昨年の報告書で記載したようにダイバータの熱・粒子制御や炉工学的に多くの利点が存在するものの、磁気井戸の性質を持つトカマクの標準的な配位 D 形状と異なり、磁気丘となりやすいことから MHD 的には不利であると見られていた。特に、局所交換型不安定性であるメルシエモード(Mercier instability)に対する安定性(安定化条件: $1/4 - D_M > 0$)や Mercier モードとキンクの結合が問題となる。これらを踏まえて、我々は、理想 MHD 安定性の評価を行った (Medvedev-Kikuchi 等: 2014 年 IAEA FEC ポストデッドライン論文)。

MHD 安定性評価は、 $R=7m$, $a=2.7m$ ($A=R/a=2.6$), $\kappa=1.5$, $\delta=-0.9$ で評価を行った。負三角度配位は磁気丘 ($dU/d\phi = d^2V/d\phi^2 > 0$, V : 体積, ϕ : トロイダル磁束) であるためにプラズマが交換型不安定性に対して不安定になる可能性がある。一方、交換型不安定性は磁気シアで安定化されるので MHD 安定な配位を得るためには磁気シアを強くすることが重要である。Mercier モード安定性が確保されてもバルーニングモードが不安定になる今回の安定性計算では、特に周辺の磁気シアを強くするためにダブルヌル配位で計算を行った (KINX コード)。図 1 に示す負三角度配位の場合、中心領域を Mercier モード限界近くになるようにプラズマ圧力分布を設定することで $\beta_N=3.2$ が安定性限界 (安定化壁無し) であることを明らかにした。中心部で Mercier モードが不安定になるのを避けるために中心部は圧力分布を平坦化する。これは、ARIES-I 等の安定限界に比べても遜色はなく、炉に必要とされる最低限のレベルを確保することが可能であることを示している。この配位では 70%程度とかなりのブートストラップ電流が流れるので連続運転にも有利であるが、分布の整合性を取ると少しベータを下げる必要があることが分かっている。

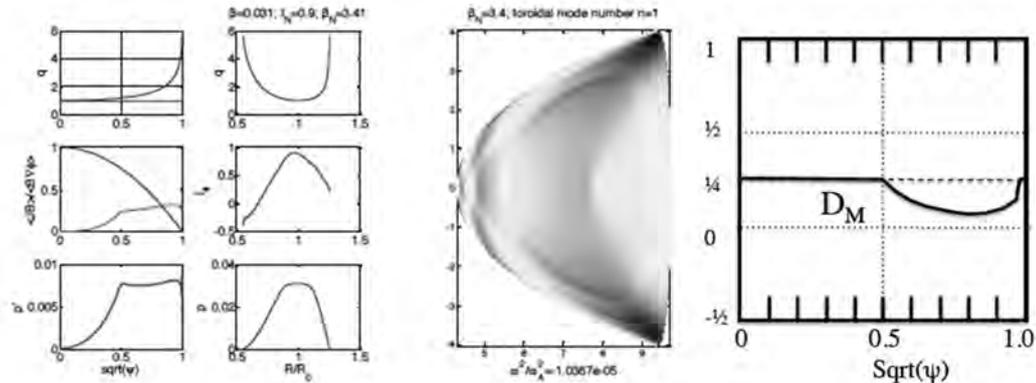


図 1 : 負三角度トカマクの分布と $n=1$ モード構造(不安定となる $\beta_N=3.4$ の場合)と D_M 分布 [7]

大きな ELM の回避が可能であるかどうかは本配位の重要な評価項目である。標準的な D 形状トカマクでは、周辺部が第 2 安定化領域に入ること、高 n モードが安定化され、周辺部のベータ $(dp/dr)_{crit}$ は上がるもののそれに付随した表面電流のようなブートストラップ電流が不安定モードを低 n 化して巨大な ELM エネルギー損失を起こす。負三角度トカマクでは周辺ベータ限界は低いので表面電流状のブートストラップ電流は回避できている。また、第 2 安定化領域への窓も閉じられていることから大きな ELM を回避する可能性があると予想される。このため、今後は非線形の MHD 計算が必要であり、USTC(NIMROD)や LLNL(BOUT++)の研究者と共同研究の可能性を議論している。

2. 負三角度トカマク配位とヘリカルの相似性

ヘリカル方式の代表格であるLHDは高エネルギー粒子の閉じ込めと帯状流の最大化の観点から内寄せ配位が優れた性能を示すがMercierモードが不安定になることが課題となっていた。一方、渡邊(Nucl. Fusion 2005)で明らかになっているようにMercierモードによって最大ベータが制限されるわけではない。一方で、トカマクの場合はMercierモードとキンクモードの結合により内部モード化するという課題も新たに見いだされており、その非線形挙動を調べるのが今後の課題である。

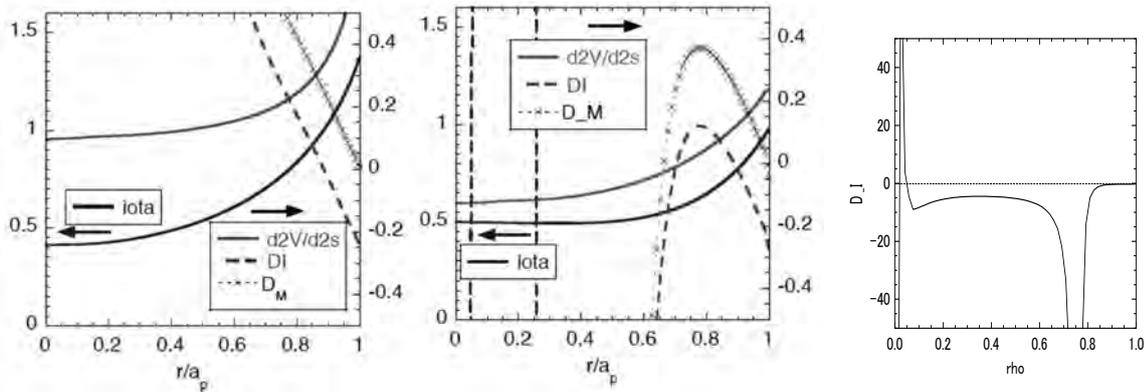


図2 : LHD の内寄せ配位($R=3.5\text{m}, \langle\beta\rangle=0.8\%$)と外寄せ配位($R=3.75\text{m}, \langle\beta\rangle=1.0\%$)の $1/q$, $d^2V/d\phi^2$, $DI = -1/4 + D_M$ (図中の D_M は異なる定義 $= -DI/q^2$) 分布。Mercier 安定化条件は $DI < 0$ となる。閉じ込め性能の良い LHD の内寄せ配位は $DI > 0$ 領域が多く Mercier モードが観測されているが、達成ベータ値はそれを大きく上回っている。右端の Heliotron J は基本的には磁気井戸配位であり、ゼロシア領域(0.7-0.8)では DI は大きな負値を取る。

[口頭発表リスト]

- [1] 菊池満、滝塚知典、古川勝、負三角度トカマク核融合プラズマの可能性 (1 : 配位の特徴)、日本物理学会第69回年会、広島大学 (2014年3月)
- [2] M. Kikuchi, A. Fasoli, T. Takizuka, P. Diamond, S. Medvedev, X. Duan, H. Zushi, M. Furukawa, Y. Kishimoto, Y. Wu, O. Sauter, L. Villard, S. Brunner, G. Merlo, J.M. Kwon, G. Zheng, K. Mishra, M. Honda, H. Urano, M.J. Pueschel, D. Told, A. Fujisawa, K. Nagasaki, F. Sano, 4th APTWG conference, June 21, 2014
- [3] M. Kikuchi, A. Fasoli, T. Takizuka, P. Diamond, S. Medvedev, X. Duan, H. Zushi, M. Furukawa, Y. Kishimoto, Y. Wu, O. Sauter, L. Villard, S. Brunner, G. Merlo, G. Zheng, K. Mishra, M. Honda, H. Urano, M.J. Pueschel, D. Told, A. Fujisawa, K. Hanada, K. Nagasaki, F. Sano, K. Imadera, A. Ivanov, A. Martynov, Yu.Yu. Poshekhonov, D. Chen, "Feasibility studies of Negative Triangular Tokamak Configuration for Fusion Reactor", Plasma Conference 2014, Niigata, 19pC2-1.
- [4] M. Kikuchi, A. Fasoli, T. Takizuka, P. Diamond, S. Medvedev, X. Duan, H. Zushi, M. Furukawa, Y. Kishimoto, Y. Wu, O. Sauter, L. Villard, S. Brunner, G. Merlo, G. Zheng, K. Mishra, M. Honda, H. Urano, M.J. Pueschel, D. Told, A. Fujisawa, K. Hanada, K. Nagasaki, F. Sano, K. Imadera, A. Ivanov, A. Martynov, Yu.Yu. Poshekhonov, D. Chen, 「核融合研究開発のブレイクスルー：除熱性能の飛躍的改善に向けて」、京大エネ研インフォーマルミーティング「核融合研究開発のブレイクスルーはどこにあるか?」, 2015年1月20日

[論文発表リスト]

- [5] M. Kikuchi, T. Takizuka, M. Furukawa, Negative Triangularity as a Possible Tokamak Scenario, JPS Conf. Proc., Vol.1, 015014 (2014)
- [6] M. Kikuchi, A. Fasoli, T. Takizuka, P. Diamond, S. Medvedev, X. Duan, H. Zushi, M. Furukawa, Y. Kishimoto, Y. Wu, O. Sauter, L. Villard, S. Brunner, G. Merlo, J.M. Kwon, G. Zheng, K. Mishra, M. Honda, H. Urano, M.J. Pueschel, D. Told, A. Fujisawa, K. Nagasaki, F. Sano, "Negative Triangularity Tokamak as Fusion Energy System", 1st International e-Conference on Energies 2014 (March 14-31), e002; doi:10.3390/ece-1-e002: <http://www.sciforum.net/conference/ece-1/paper/2321>
- [7] S. Medvedev, M. Kikuchi, L. Villard, T. Takizuka, P. Diamond, H. Zushi, K. Nagasaki, X. Duan, Y. Wu, A.A. Ivanov, A.A. Martynov, Yu.Yu. Poshekhonov, A. Fasoli, O. Sauter, "Negative triangularity tokamak: stability limits and perspectives as fusion energy system", IAEA Fusion Energy Conference, St Petersburg, 2014, post deadline paper PD/P5-1. Submitted to Nuclear Fusion.

[書籍出版]

- [8] 工藤和彦、田中知、上坂充、菊池満、藤井靖彦編、「原子力・量子・核融合事典」、丸善出版、2014。

重水素プラズマ慣性静電閉じ込め装置(IEC)から発生するパルス状放射線の計測技術の開発

三澤 毅¹, 高橋佳之¹, 八木貴宏¹, 後藤翔平², 福士留太², 増田 開³

¹京大原子炉実験所, ²京大エネルギー科学研究科, ³京大エネルギー理工学研究所

1. 研究の目的

重水素プラズマの慣性静電閉じ込め (Inertial Electrostatic Confinement; IEC) を利用した放電型装置は、小型でしかも重水素のみを用いた D-D 反応により中性子を発生させることが可能でトリチウムのような放射性物質を用いない高出力中性子源として幅広く利用することができると考えられている。現在、この装置から発生する高エネルギーの中性子を核燃料物質に照射しその核分裂反応により発生する放射線 (中性子と γ 線) を計測するための核セキュリティ関連の技術開発を行っている。

本研究においては、エネルギー理工学研究所において現在開発が進められている中性子発生源としての IEC 装置の特性を把握するため、この装置から発生する中性子を測定することにより IEC の特性、特にパルス状放射線の特性を調べ、さらにそのために使用する検出器とその測定システムの開発を行うことを目的としている。

2. 中性子測定実験と数値解析

実験では液体シンチレータを用いて IEC 装置と組み合わせて中性子と γ 線の測定を行った (図 1、図 2)。この検出器では入射中性子がシンチレータ中の主として水素と弾性散乱反応を生じ、反跳された陽子イオンに起因とするシンチレーション光を検出することにより中性子のエネルギーを測定することができるという特徴がある。また、観測されるシンチレーション光の減衰時間の違いにより中性子と γ 線とを弁別して測定することができる。

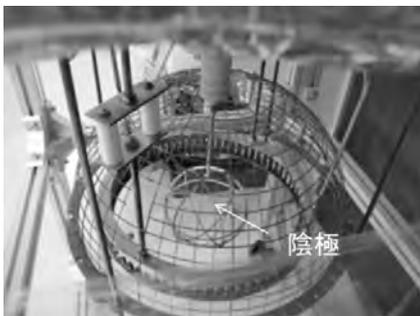


図 1 IEC 装置と検出器

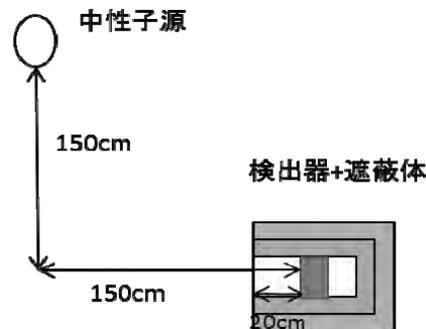


図 2 実験配置の概略図

D-D 中性子源から発生する単色の 2.45MeV の中性子を核物質の存在が疑われるコンテナ等に照射した場合、核物質が無い場合は 2.45MeV 以上の中性子は測定されないが、核物質がある時は核分裂スペクトルから考えて 2.45MeV 以上の中性子が測定される。この手法を Threshold Neutron Energy Analysis (TNEA)法と呼ぶ。この核物質探知システムは数値計算によるシミュレーションにより設計を行うため、予め数値計算の妥当性を検証する必要がある。そこで、D-D 中性子源と検出器を用いた図 2 のような体系において、中性子発生量を変化させながら中性子計数率を測定する実験を行い、その結果を数値計算による結果と比較した。計算には連続エネルギーモンテカルロコード MCNP6 を使い、検出器に

入射した中性子と検出器内の水素との弾性散乱反応率を求めた。

結果を図 2 に示す。縦軸が中性子計数率、横軸が D-D 中性子源からの中性子発生率を示す。数値計算の値と実験値は中性子発生量が 3.0×10^7 n/s のときの計数率で規格化しており、両者はよく一致していることが判る。この結果より MCNP6 を用いた計算を核物質探知システムの開発におけるシミュレーションに適用できると考えられる。

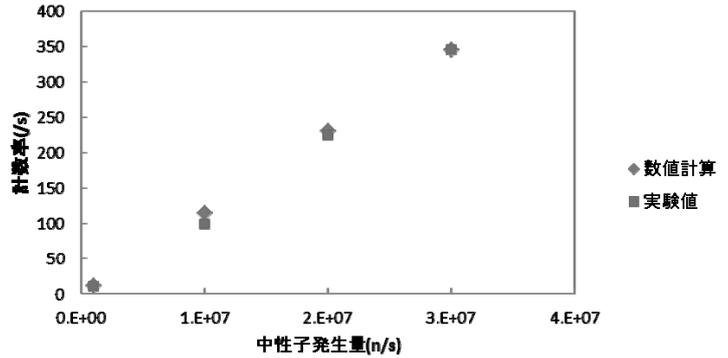


図 3 計数率の実験値と計算値

3. 検出器のノイズ測定

TNEA 法を有効に活用するためには、DD 中性子源のエネルギーを超える 2.45MeV 以上のエネルギー領域に測定される信号の計数(以下ノイズ)をできる限り減らす必要がある。そのため、中性子源からの計数率とノイズの関係を測定した。実験では中性子量を変化させてノイズ発生量を求めた。ノイズが 2.45MeV 以下の中性子の計数のパイルアップに依存していると仮定し、両者の関係を測定した結果を図 4 に示す。縦軸のノイズの計数率は中性子発生量が増加するにつれて増え、その増え方は線形ではなく 2 次関数に近い形状で近似できることが判った。

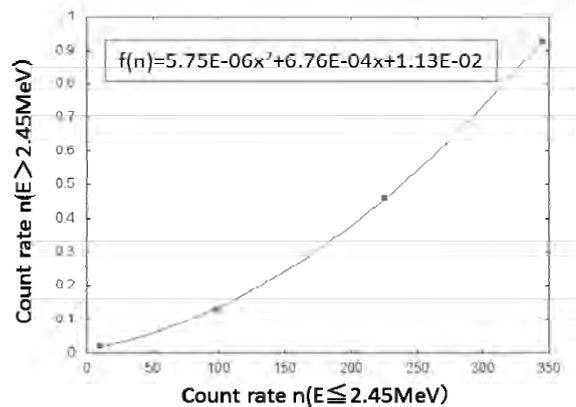


図 4 中性子計数率とノイズの関係

この測定に併せて、測定波形を詳細に取り込むことができる別の測定システムを用いて波形解析を行ったところ、低い波高の信号のパイルアップが存在していることを測定され (図 5)、これがノイズの原因になっていることを確認することができた。

4. まとめと今後の課題

IEC 中性子源の検出器からなる体系について実験と数値解析を行い、MCNP6 により実験を精度良く評価することができることが判り、今後の核物質探知システムのシミュレーションに用いることにする。また発生する中性子を有機液体シンチレータを用いて測定すると、中性子発生量に依存して信号のパイルアップ等

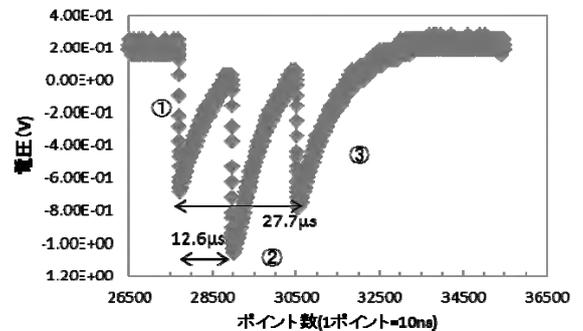


図 5 パイルアップ波形

により波高の高い成分にノイズが生じてしまうこと、その量は中性子発生量に依存していることが判った。さらにその発生量を実験的に定量化することができた。TENA 法の精度をより向上させるためにはこの BG ノイズをより一層低減させる必要があるが、今回の研究で詳細な波高分析を行うことでノイズを低減させることができる可能性があることが判ったので、今後実際に IEC 中性子源を用いた測定へ応用する予定である。

顕微分光による高品質グラフェン およびカーボンナノチューブの光・電子物性評価

岡田光博¹, 趙 思翰¹, 宮内雄平², 毛利真一郎², 篠原久典¹, 松田一成², 北浦 良¹

¹名古屋大学理学研究科物質理学専攻

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景

太陽光エネルギーを始めとする自然エネルギーの高効率利用は、重要かつ危急の課題である。高効率エネルギー利用において鍵となる高性能エネルギー変換・蓄積デバイスの実現には、適切なデバイス構造などの工学的要素だけでなく、デバイスに用いる物質の物性も極めて重要である。このため、卓越した光・電子物性を持つナノマテリアルをエネルギーデバイスへ応用する研究が、活発に展開されている。ナノマテリアルの中でも、グラフェンやその関連物質は、卓越したキャリア輸送特性と光学特性を持つため、少ないエネルギー消費で作動するトランジスタや、高効率な光電変換素子、発光デバイスへの応用が有望視されている。

ナノマテリアルを用いた光・電子デバイスの可能性を開拓するためには、種々の外因性の影響を排し、その本来の光・電子物性を理解することが肝要である。グラフェンやその関連物質は、厚さが単原子～数原子の原子層物質であるため、物質を構成する原子のほぼ全てが表面に露出している。このため、下地となる基板との相互作用を始めとする表面・界面の影響がその物性に本質的な影響を及ぼしうるが、その光・電子物性へ与える影響については未だ理解の途上にある。

そこで、当研究グループは、種々の基板上に直接合成した高品質の原子層物質を対象とした光物性研究に着手した。種々の基板へ直接合成することで、余分な溶液プロセスを介さずにクリーンな物質-基板界面が得られる。このため、ナノマテリアル本来の物性を観測することが可能となり、ナノマテリアルを用いた光・電子デバイス実現のための礎となる知見を得ることができる。本課題では、ポストグラフェン物質として近年注目を集めている遷移金属ジカルコゲニド原子層 (TMDC, 図1) を主対象とし、周環境を制御した高品質試料の作成とその光物性観測を目的とした。



図1 遷移金属ジカルコゲニドの構造モデル図 (3原子厚の原子層物質である)

2. 実験方法

TMDC の試料は、化学気相成長(CVD)法によって合成した。本研究で用いた CVD 合成装置を図2に示す。この装置は、電気炉を3つ連結した構造を持ち、成長温度、金属供給量およびカルコゲン供給量を独立に制御することができる。金属およびカルコゲン源は、それぞれ金属塩化物と硫黄を用い、TMDC を成長させる基板としては、 SiO_2/Si 、サファイア、六方晶窒化ホウ素を選択した。TMDC の CVD 合成は、100～400 sccm のアルゴン気流下において、石英の反応管中に設置した基板へ金属塩化物および硫黄をガス状

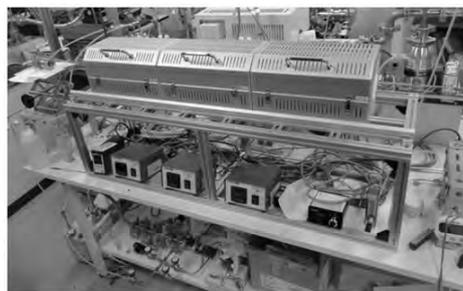


図2 合成に用いた装置の写真

にして供給し、基板上へ原料を吸着・反応させることで行った。生成した TMDC は、光学顕微鏡、走査電子顕微鏡(SEM)および低エネルギー電子線回折によって構造を評価した後、ラマン分光、発光分光測定を行った。

3. 結果と考察

図 3 に六方晶窒化ホウ素上に合成した WS_2 の SEM 像を示した。SEM 像に多数観察される三角形のコントラストが、成長した WS_2 の結晶である。顕微ラマン分光によって、成長した結晶は単層の WS_2 であることが確認できた。三角形の結晶が成長する理由は、CVD 成長中にジグザグ構造を持つエッジが優先的に生成するためである。また、三角形の配向は互いに 60 度回転した 2 通りの方向に制限されていることも明らかになった。低エネルギー電子回折測定を行ったところ、下地である六方晶窒化ホウ素の結晶方位と強い相関があることがわかった。これは、成長の初期の段階で生成した WS_2 の微小な結晶核が、六方晶窒化ホウ素上を表面拡散する際に安定な配向に落ち着き、その後大きな結晶へと成長するためであると考えている。

図 4 には六方晶窒化ホウ素および SiO_2 上へ CVD 成長した WS_2 の発光スペクトルを示す。六方晶窒化ホウ素上に成長した WS_2 の発光ピークは、 SiO_2 に成長した WS_2 からのピークに比べて高エネルギー側に位置し、その半値幅は半分以下であった(ピーク位置は 2.00 eV、半値幅は 25 meV)。これは、これまでに報告された単層 WS_2 の室温における発光ピークと比較して、もっとも半値幅の狭いシャープな発光ピークである。

一般に、TMDC などの低次元物質の発光スペクトルは、励起子の寄与が極めて大きい。また、TMDC の試料は、欠陥や不純物による意図しないキャリアドーピングが多く、励起子がキャリアと結合した荷電励起子による発光が、励起子発光の 20~30meV 低エネルギー側に現れることが知られている。このため、欠陥が多く意図しないキャリアドーピングが顕著な低品質の試料では、発光スペクトルがブロード化する。六方晶窒化ホウ素上へ合成した WS_2 の発光ピークが極めて小さな半値幅を持つということは、本試料が欠陥や不純物が少ない高品質なものであり、 WS_2 本来の光物性を観測するのに適したものであることを意味する。現在、この高品質 WS_2 試料を用いて、TMDC に特有の運動量空間における自由度であるバレーが関与する現象の観測を試みている。

4. 発表リスト (1,2 口頭発表、3 論文発表)

1. M. Okada, et. al., Direct CVD synthesis of atomic layered WS_2 on hBN substrates, 47th FNTG general symposium, 2013 年 6 月 24-28 日、Nagoya Univ.
2. 岡田光博ら, hBN 上への原子層 WS_2 の直接 CVD 合成, 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 2014 年 9 月 7 日、北海道大学
3. M. Okada, et al., "Direct chemical vapor deposition growth of WS_2 atomic layers on hexagonal boron nitrides", ACS Nano, 8, 8273-8277, 2014, 発行済

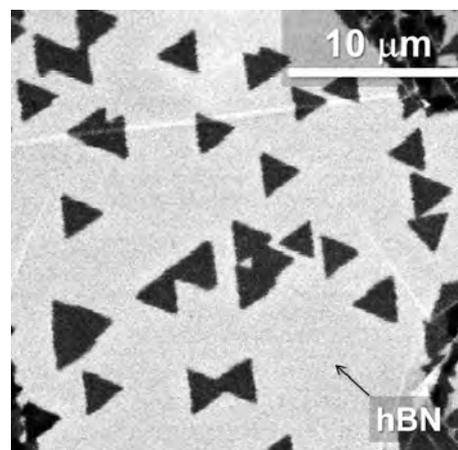


図 3. 合成した WS_2 の SEM 像

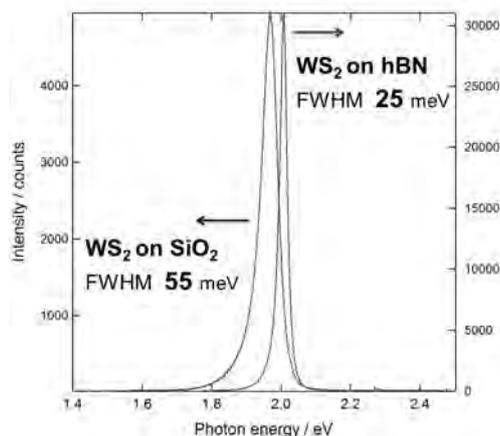


図 4. 室温における WS_2 の発光スペクトル

イオン照射 dewetting を利用したガラス基板表面の 金属ナノ構造制御

柴山環樹¹, 谷津茂男¹, 石岡準也¹, ウ エイケン², 近藤創介³, 檜木達也³

¹北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センター

²北海道大学大学院工学院大学院生

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

これまでに、ゼロエミッションエネルギー研究拠点の共同研究を通じて、酸化物基板に金属ナノ粒子をイオン照射によって分散することによって、表面プラズモン共鳴効果を利用した各種光学デバイスの開発基礎研究を進めてきた。これらの光学デバイスは、生体活動の微量代謝物や環境中の微量汚染物質などを検出するための表面増強ラマン分光などを応用したバイオセンサーとして期待されており、高い変換効率を有する太陽電池や高輝度ディスプレイ等の光学デバイス開発に展開できることから注目されている。

しかし、数 100kV オーダーのイオン照射では、イオン照射誘起 dewetting 現象が発現し、シリカガラス表面に蒸着した金や銀の薄膜が単結晶貴金属ナノ粒子としてシリカガラス表面に 2 次元的に 1 層だけ分散させ包埋させる条件を見出したが、DuET を利用した MeV オーダーのイオン照射では、エッジを形成したチャンネル構造を形成することがわかったが、Dewetting によりナノ粒子化する条件を見出すことができなかった。

そこで、この研究成果をもとに、平成 26 年度は、予め北海道大学にて熱処理を行い Thermal Dewetting により金や銀の島状結晶やサブマイクロ結晶を形成し、DuET を利用した MeV オーダーのイオン照射を行い、その貴金属粒子の形態を制御して可視光の吸収ピークの波長を制御し、革新的な光機能を有する材料システムを構築するための基礎研究を行うことを目的とするとともに、ウエイブガイドを目標とした不定形なチャンネル構造を積極的に創成することを目指し基礎研究を行うことを目的とした。

2. 実験方法

誘電体基板（酸化物基板）と貴金属微粒子の分散形態に対する基板の結晶性や格子定数のミスマッチ等が与える影響を検討するため、ガラス基板（SiO₂）と単結晶基板（Al₂O₃、TiO₂）を用いたが、マシントイムの関係から、DuET 照射には、SiO₂ ガラス基板を用いた。北海道大学大学院工学研究院附属エネルギー・マテリアル融合領域研究センターにて高周波スパッタ装置及び真空蒸着装置を利用して貴金属薄膜を SiO₂ ガラス基板表面に形成させた。イオン照射前の表面形態を原子間力顕微鏡（AFM）と光学顕微鏡ならびに電界放出型走査型電子顕微鏡（FE-SEM）を用いて観察するとともに可視光領域の吸光度についても日本分光の吸光度計（V-630）を用いて取得した。

京都大学エネルギー理工学研究所の DuET を利用して、MeV オーダーの Si イオンや Fe イオンを Au 薄膜を蒸着した SiO₂ ガラス基板試料に照射した。照射量は、最大 5.0×10^{16} ions/cm² を目標とした。照射温度は、ビームヒーティングを考慮して、試料加熱装置に 200°C から 300°C 程度に予熱し、照射開始直後の温度変化からビームヒーティングにより温度が一定になるように調整し、トータルの照射量だけでなく単位時間当たりの照射束にも留意して照射条件を設定した。照射後の表面形態観察は、MUSTER 施設の FE-SEM などを利用して行った。また、イオン照射後の試料を、北海道大学に持ち帰り可視光領域の吸光度測定を行った。更に、AFM やや北海道大学のナノテクプラットフォームの FE-SEM を利用して表面の形態観察及び FIB による断面観察試料作製と FE-TEM による微細組織解析を行い、微細

構造と吸光度の相関について解明を試みた。平成 24 年度までに照射した試料についても、引き続き平成 26 年度も検討を重ねたのでその結果についても報告する。

3. 実験結果と考察

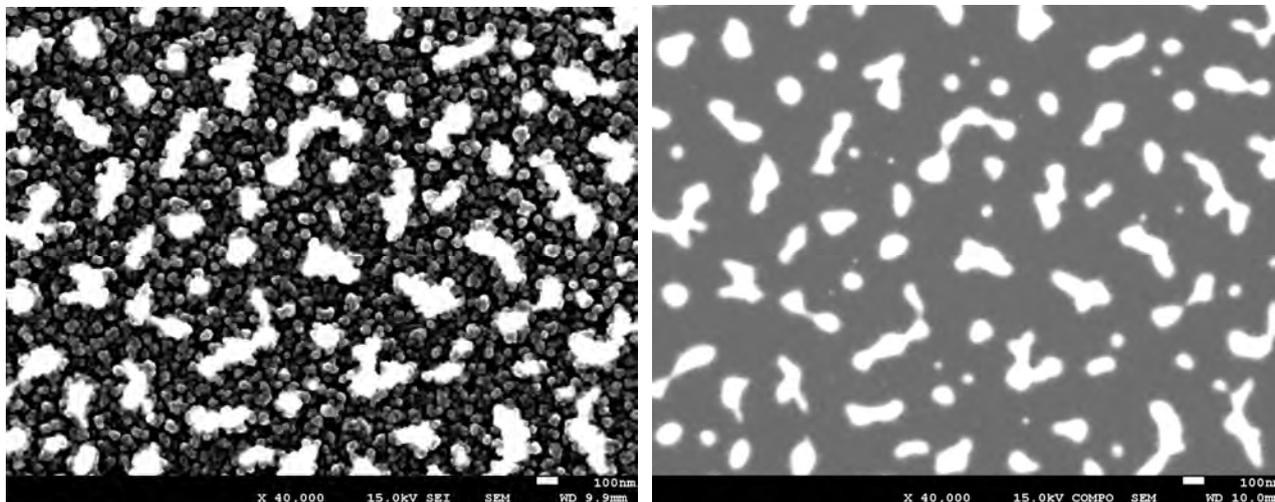


図1 Si²⁺イオンを 6.0×10^{16} ions/cm² 照射後の Au/SiO₂ ガラス基板表面の(a)FE-SEM 像、(b) COMPO 像

図1に Si²⁺イオンを 6.0×10^{16} ions/cm² 照射後の Au/SiO₂ ガラス基板表面の(a)FE-SEM 像、(b) COMPO 像を示す。図1の(a)に示すように FE-SEM 像には、白いコントラストを呈する不定形な領域と、グレーの濃淡でエッジのコントラストが明るい粒状の組織が微細に分散している領域が存在することが分かった。これまでの、低エネルギー Ar⁺イオン照射では、狭い範囲のばらつきで 50~80nm の球状の金ナノ粒子が得られる条件を見出しているが、高エネルギー Si²⁺イオン照射では見出していなかったことから、FE-SEM に付属する EDS や COMPO 像を用いて 50nm 程度の粒子の同定を行った。その結果、図1の(b)に示すようにいくつかの粒子は、原子番号が大きい白いコントラストを呈し、EDS から金ナノ粒子であることが確認できたが、多くの粒子は白いコントラストを呈せず、EDS から Si や O のピークを示していたことから、SiO₂ 基板表面にスパッタやスパッタ物の再付着などで粒状の物質が表面に形成し、金が付着あるいは金を含む複合酸化物として存在していることが示唆された。詳細な検討は、今後の断面 TEM 観察から明らかにする予定である。

4. まとめ

Si²⁺イオンを 6.0×10^{16} ions/cm² 照射後、Au/SiO₂ ガラス基板表面に数 100nm の不定形の金膜が存在し、50~80nm の金ナノ粒子が存在することが分かった。それ以外の領域は、金ナノ粒子ではなく、Si や O を主体として若干金を含む複合酸化物と思われる多くの粒子状の物質が形成していた。昨年度得られたブロードな吸光スペクトルは、照射後の SiO₂ 基板表面に存在する金ナノ粒子の数密度が低エネルギー Ar⁺イオン照射に比較して少ないことに起因すると考えられる。今後は、高エネルギーイオン照射の特色を生かしたチャンネル構造の形成やイオン照射誘起発光をその場で計測し表面の組織変化と機能特性の変化を一度にとらえることが出来るシステムの構築に展開していきたい。

5. 本年度 発表リストについて

[口頭発表リスト]

Ruixuan Yu, Tamaki Shibayama, Shigeo Yatsu, Junya Ishioka, Seiichi Watanabe, Ion and nanosecond-pulsed laser co-irradiation effects on the surface nanostructure of Au thin films on SiO₂ glass substrates, 10th Japanese-Polish Joint Seminar on Micro and Nano Analysis, Hokkaido University, Spporo, Japan, Oct. 24-26, 2014. (ポスター)

核融合壁材料健全性評価のための レーザー照射とイオンビーム照射によるタングステン溶融層 の挙動解析

伊庭野健造¹, 笠田竜太², 小西哲之²

¹大阪大学大学院工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 概要

核融合炉内の壁面に対する高熱粒子負荷によって生じた溶融層の挙動をシミュレーションするため、溶融層の挙動を解析する計算コードの開発とタングステンの熱負荷試験に関する準備を行った。また、溶融層の挙動が生じた場合に、核融合炉の運転にどのような影響が生じるか核融合炉システム統合コードを用いて解析を行った。溶融層の移動が生じることが、炉壁の損耗率に最も大きく寄与する可能性が示された。

2. 目的

ITER での安定した核融合プラズマ試験や核融合炉原型炉の運転を行うためには、炉材料の損耗を予測し、予定外の機器交換の頻度を低下させる必要がある。特に金属壁を使用する場合は、ディスラプションや ELM などによってパルス高熱粒子負荷が局所に集中した場合や、冷却不良が検知されず運転が持続した場合において、溶融層の生成とその移動による損耗が懸念されている。高融点材料のタングステン溶融層の挙動は、不明確な部分が多く、実験とシミュレーションの両方から研究される必要がある。そこで、高温タングステンの挙動試験に関する実験準備と溶融層の挙動を解析するためのコード整備を行うと共に、溶融層の挙動が核融合炉の運転にどのような影響を及ぼすのかシミュレーションすることを目的とした。

3. 溶融層挙動解析シミュレーションコードの開発

溶融層挙動解析を行うシミュレーション方法として、流体方程式を数値計算を用いて解く Volume of Fluid 法を基にした計算コードを開発した。より正確な流体計算を行うためには、CIP 法などの計算コストの高い移流方程式の解法方法を用いることが主流となっている。しかし、本研究では新たに Lax-Wendroff 法をベースにした新規解法を開発を行うことで、より低い計算コストで移流方程式を解法できる可能性を検証した。図に示すように、新しい計算手法を用いると、1次元の矩形波の移流に関して CIP 法と同等の計算結果が得られることが示している。

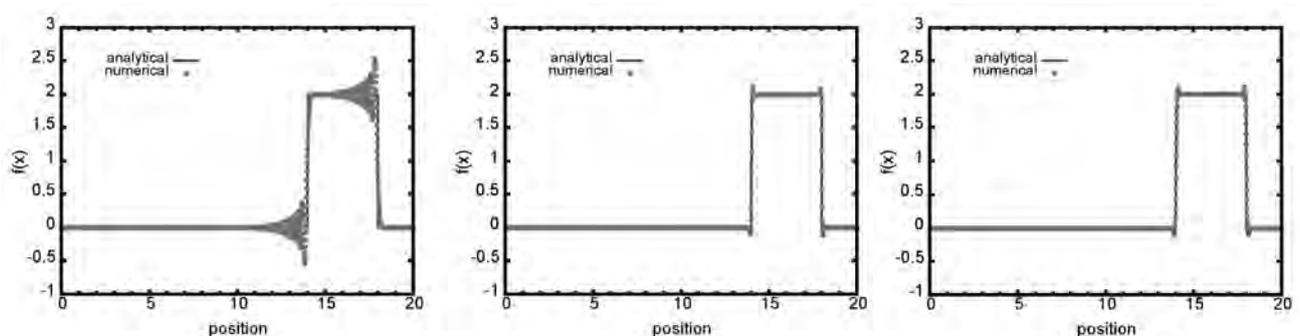


図1 矩形波の移流に関する数値計算結果の比較。
Lax-Wendroff 法 (左)、CIP 法 (中) と本研究によって開発された新手法 (右)。

4. 核融合炉システム統合コードによる溶融層挙動の影響解析

溶融層挙動の影響解析を行うために、核融合炉システム統合コードを整備した。コードを用いて、冷却不良が起こったまま運転が持続した場合や、ELMによる高熱粒子負荷が生じた場合に、溶融層が生成する条件や、溶融層の移動によってどのような影響があるかを評価した。炉システム統合コードは、プラズマ、周辺プラズマ、壁面、機器内部の伝熱などに関する簡易モデルを組み合わせ、プラズマ運転による壁の損耗と、壁から生じた不純物によるプラズマ運転への影響を評価できるものである。例として、ダイバータにおいて不純物ガスによる冷却の不良が生じながらも、運転が持続したケースに関する解析例を示す。図に示されているように、冷却不良による熱負荷の増大、ダイバータ板の表面温度の上昇、それに伴う放出不純物量の増加、そしてプラズマ性能の劣化がシミュレーションされている。このような事象が生じた際に、壁面の損耗量がどのように溶融層の移動速度に依存するかを解析し、他の不確定要素に関する解析と比較することで、溶融層の移動による損耗が最も大きい感度を示すことが示された。

これらの成果は、発表リストに記載した論文にまとめられている。

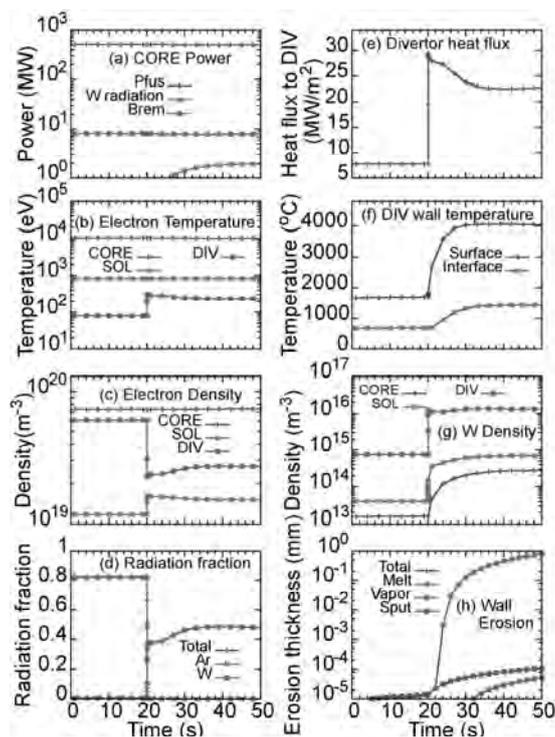


図2 核融合炉システム統合コードによるダイバータに対する冷却ガス損失事象の解析例

5. まとめと今後の課題

移流方程式の数値計算法に関する Lax-Wendroff 法を基にした新規手法を開発した。また、炉システム統合コードを用いた解析によって、金属溶融層が生じた際の損耗が、他の損耗要因よりも顕著に大きくなる可能性が確認された。本研究によって開発された新規手法を2次元に拡張し、流体計算への応用を行っていくことで、溶融層挙動解析に応用することが今後の課題となる。

6. 発表リスト

[口頭発表リスト]

K.Ibano, T.Tsutsui, S.Togo, Y.Ogawa, "Developments of tungsten wall erosion and transport models for the transient analyses of a fusion reactor at anomaly events", 21st International Conference on Plasma Surface Interaction 2014, 26-30 May 2014, Kanazawa, Japan (Poster)

K.Ibano, T.L.Lang, S.Togo, Y.Ogawa, "Effects of Tungsten Melt Layer Motion, Vapor Shielding, and Prompt Re-Deposition to the ELMy H-Mode Operation", Technology of Fusion Energy, 10-13 November 2014, Anaheim, CA, USA

[論文発表リスト]

K.Ibano, T.Tsutsui, S.Togo, Y.Ogawa, "Effects of impurity transport and melt layer motion to the tungsten wall erosion during anomaly events", Journal of Nuclear Materials, *in press*

K.Ibano, T.L.Lang, S.Togo, Y.Ogawa, "Effects of Tungsten Melt Layer Motion, Vapor Shielding, and Prompt Re-Deposition to the ELMy H-Mode Operation" Fusion Science and Technology, *submitted*

ヘリカル系プラズマの乱流の非線形ダイナミクスと構造の探求

石澤明宏¹, 岸本泰明², 中村祐司², 小林進二³, 長崎百伸³, Li Jiquan², 今寺賢志², 佐野史道³

¹核融合科学研究所ヘリカル研究部

²京都大学エネルギー科学研究科

³京都大学エネルギー理工学研究所

1. 導入

軸対称性を持たない 3 次元トーラスプラズマであるヘリカルプラズマは外部コイルが作る磁場のみで閉じ込めることが可能であり、高温プラズマの長時間保持に有利である。現在までに、ヘリカルプラズマの閉じ込めに対して、その 3 次元性に関する自由度を用いて MHD 不安定性の低減および新古典輸送の改善を実現する磁場配位が提案されてきた。近年、プラズマの非線形ダイナミクスである乱流によって生じる熱および粒子輸送の改善を目的として、さらなる 3 次元性の最適化を探求するためにジャイロ運動論シミュレーションがなされ始めている (P. Helander, IAEA-FEC (2014))。核融合科学研究所の大型ヘリカル装置 (LHD) プラズマのモデル配位に対しては、磁気軸位置に対する新古典輸送の最適化がゾーナル流と呼ばれる構造の効率的な形成を引き起こすことが示された。一方、この最適化は MHD 不安定性に対しては不利な方向であるとともに乱流を引き起こす微視的不安定性に対しても不利になる。その結果、磁気軸位置に対する最適化はゾーナル流生成効率と不安定性抑制の間で妥協が必要となる。一方、LHD プラズマ中の乱流に生じる新たな構造形成が明らかになった (A. Ishizawa, Phys. Plasmas 055905 (2014))。この構造形成は LHD プラズマ乱流を模擬したシミュレーションによって得られた興味深い非線形現象である。

本研究では、電磁的ジャイロ運動論シミュレーションコードを用いてヘリオトロン J プラズマにおける不安定性および乱流の数値シミュレーションを行う。そして、3 次元磁場配位の最適化による乱流輸送の低減およびその低減機構の理解を目指す。

2. 数値シミュレーション結果

導入で述べたとおりヘリオトロン J プラズマは外部コイルが作る磁場によって閉じ込められる。この磁場配位は主に磁気シアと磁場のバンピネスによって特徴づけられるので、磁気シアとバンピネスの不安定性および乱流輸送への影響を調べた。VMEC コードによって求めた平衡を用いてジャイロ運動論計算を行った。その結果、ヘリオトロン J プラズマはイオン温度勾配不安定性に対して不安定であることを明らかにした。

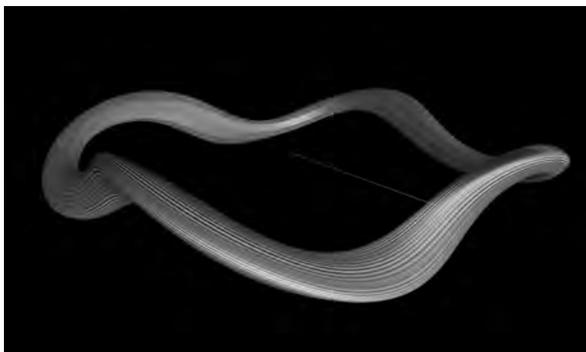


図1 ヘリオトロン J プラズマに生じたイオン温度勾配不安定性の線形成長時の静電ポテンシャル揺動。小半径は $\rho = 0.5$ 。

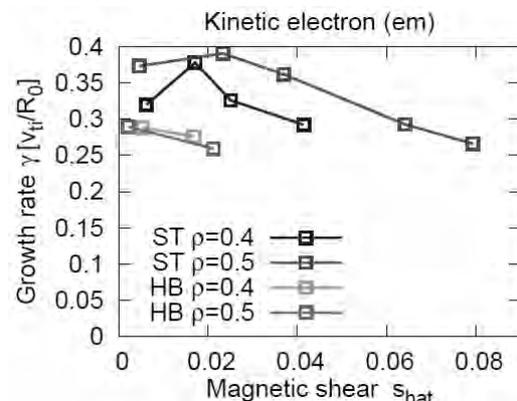


図2 線形成長率 γ の磁気シア依存性およびバンピネス依存性。ST は標準配位、HB は強バンピネスを表す。

図1はこの不安定性の線形成長時の静電ポテンシャル揺動分布の3次元カラー分布を示す。上から見てほぼ四角形となるトーラスの角かつトーラス外側で不安定性の振幅が大きい。また、縞模様がトーラス方向に広がることは、揺動が磁力線方向に非常に伸びたモード構造を持つことを意味する。図2は標準磁場配位 (ST) と高バンピネス磁場配位 (HB) に対する小半径 $\rho=0.4$ および 0.5 において不安定となるイオン温度勾配不安定性の線形成長率を示す。全体の傾向として磁気シアが大きいほど線形成長率は減少する。特に高バンピネス磁場配位 (HB) は標準配位 (ST) と比較して成長率が減少する。したがって磁場のバンピネスはイオン温度勾配不安定性を抑制する効果がある。この抑制効果の機構を解析するうえで、イオン温度勾配不安定性がトーラス外側に現れるモードであることから、MHD バルーンモードと同様の解析が有用であることを見出した。

図3はイオン温度勾配不安定性の成長が飽和した時点での静電ポテンシャル揺動分布の3次元カラー分布を示す。非線形相互作用によって生じたゾーナル流の影響で、モード構造がトーラス内側に少し広がることがわかる。また、この図には示されていないが磁力線垂直方向には乱れた構造が現れる。この乱れによる乱流熱輸送の輸送係数が図4に示される。図2同様、STは標準配位、HBは強バンピネス配位を表す。バンピネスが強い場合、乱流熱輸送が抑制される。これはバンピネスにより不安定性の成長率が抑制されたことによると考えられる。一方、磁気シアが大きいほど乱流熱輸送が低減する。この傾向は線形成長率の違いからは説明できず、ゾーナル流などの構造形成に起因する可能性がある。

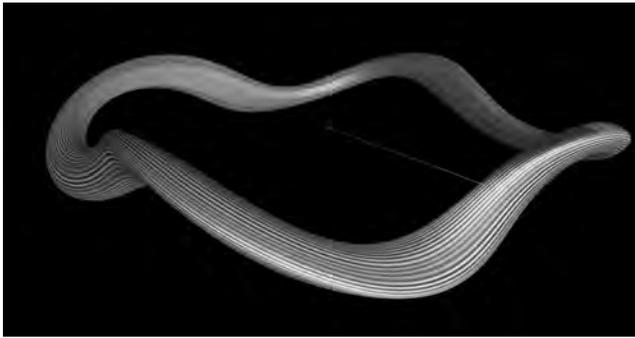


図3 イオン温度勾配不安定性の非線形飽和時の静電ポテンシャル揺動。小半径は $\rho=0.5$ 。

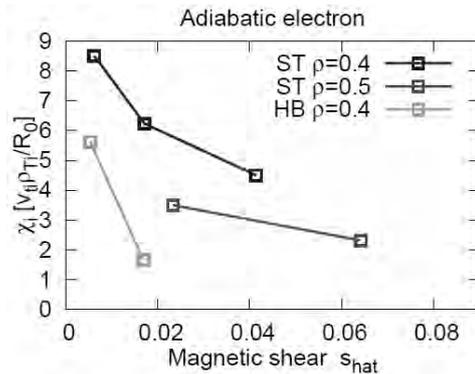


図4 乱流による熱輸送係数の磁気シア依存性およびバンピネス依存性。STは標準配位、HBは強バンピネスを表す。

3. まとめと議論

ヘリオトロン J プラズマの不安定性を調べ、イオン温度勾配不安定性が不安定であることを明らかにした。そして、プラズマ閉じ込めに影響を与えると考えられている磁気シアと磁気の本バンピネスという磁場配位を表す二つのパラメータに着目して解析を進めた。その結果、磁場配位の3次元性を特徴づける磁気の本バンピネスは不安定性を抑制することが明らかになった。さらに、非線形シミュレーションを行い、乱流輸送の評価を行った。その結果、バンピネスによって乱流熱輸送が抑制されることを明らかにした。これはバンピネスにより線形成長率が低減されたことに起因すると考えられる。さらに、磁気シアが大きいほど乱流輸送が低減する結果を得た。これはゾーナル流形成など自発的な構造形成によって乱流輸送が低減した可能性がある。また、線形成長率の低減機構を調べるうえで、MHD バルーンモードと同様の解析が有用であることが理解された。

[口頭発表リスト]

第5回エネルギー理工学研究所国際シンポジウム

The 5th International Symposium of Advanced Energy Science

2014年9月30-10月2日 (ポスター発表)

極短パルス CEP 制御レーザーとクラスター媒質の相互作用実験と理論・シミュレーション研究

福田祐仁¹, 松井隆太郎², 神保光一³, 松田一成³, 岸本泰明^{2,3}

¹日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究センター

²京都大学大学院エネルギー科学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究の背景

クラスターとは、ナノメートルサイズの固体密度の粒状物質であり、これを気体中（あるいは真空）に一定割合含む媒質を「クラスター媒質」と呼んでいる。その平均密度は、固相と気相の中間に位置する一方、固相や気相単独では発現しない粒状物質の表面に起因する少数多体系特有の性質を示す。レーザーとの相互作用では、線形領域では、電磁波が分極波として伝播するクラスターモードが存在したり、非線形領域では、同様に表面に起因する非線形効果によってレーザーエネルギーの高い吸収特性や高次高調波を含む放射特性を示したりすることが知られている。

福田らは、独自のクラスター媒質製造技術を有しており、ここ数年間にわたり高強度レーザーとクラスター媒質との相互作用研究を世界的にリードしている。近年では、福田らによる、医療応用等を目的とした高エネルギー粒子加速が特に注目されている。一方、これらの相互作用はレーザーのパルス長と強度に強く依存する。特に、レーザーのパルス長が 10 fs を下回る CEP 制御レーザーと気体原子との相互作用では、低サイクル数に起因する電子の強い非線形運動とそれに伴う高効率の高次高調波発生などが注目されている。一方、そのような CEP 制御レーザーとクラスター媒質の相互作用実験は例が少なく、単純な固相や気相では発現しない特異な現象が創出される可能性があり、それらを利用したレーザー駆動量子ビームの新たな応用研究の展開が期待される。

本研究では、レーザーとクラスター媒質の相互作用の最も基本的な素過程であるクーロン爆発とクーロン爆発によって引き起こされる背景ガスイオンの加速過程について、粒子コードを用いたシミュレーションを実施し詳細に調べた。

シミュレーションには、京都大学で岸本らが開発してきた原子過程や衝突・緩和過程を取り入れた粒子モデルによるシミュレーションコード(EPIC3D)を用いた。EPIC3D は、中性媒質から複雑な原子過程や衝突・緩和過程を通してクラスター媒質が電離する過渡過程を追跡できるコードである。このコードを利用すれば、レーザーに照射されたクラスターの複雑な電離のダイナミクスや構造を同定するとともに、実験パラメータを決定したり、実験に先立って結果の予測を行うとともに、実験を効率的にガイドしたりすることが可能となる。

2. 研究成果

原子力機構関西研において行われた背景ガスイオン加速に関する実験を模擬するシミュレーションを行った。最大集光強度が $1.0 \times 10^{19} \text{ W/cm}^2$ の高強度レーザーを、直径 250 nm の単一炭素クラスターと背景水素ガスからなるクラスター媒質に照射して、背景ガス存在下での単一クラスターの膨張ダイナミクス、背景ガスの加速、およびイオンのエネルギー分布について調べ、実験結果との比較を行った。

シミュレーションの結果、図 1 に示すように、核子あたりのエネルギーで比較すると、プロトンの最大エネルギーは、炭素イオンのその 2 倍程度にまで加速された。また、炭素イオンのエネルギー

分布には、2 MeV/u 付近に、クーロン爆発の特徴であるカットオフが見られ、プロトンのエネルギー分布はなだらかな減少を示した。

シミュレーション結果と実験結果とを比較すると、1) 炭素イオンのエネルギー分布にカットオフが見られる、2) プロトンのエネルギー分布図はなだらかな減少を示している、3) プロトンの最大エネルギーが、炭素イオンの最大エネルギーより約2倍大きい、という共通の特徴が見られ、実験結果と似た傾向を示すシミュレーション結果となっていることがわかる。

クラスターのクーロン爆発の結果、炭素イオンのエネルギーは、クラスターの膨張表面で最大となる(図2(b1))。また、クーロン爆発により生じた電場は、クラスターの膨張面で最大強度を示す(図2(a))。図2(b2)に示すように、クーロン爆発電場がピーク強度を示す場所が、高エネルギーを持つプロトンの場所に一致していることから、クラスターのクーロン爆発電場がプロトンを圧縮し加速していることが明らかになった。

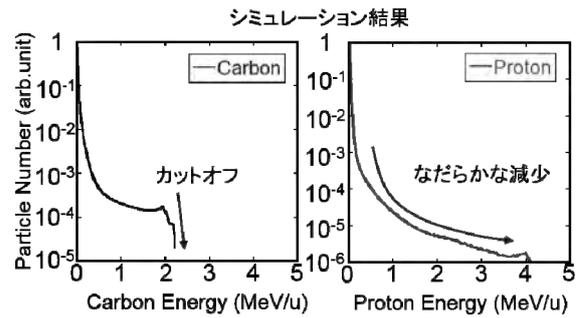


図1. レーザー入射 160 fs 後のイオンのエネルギースペクトル。

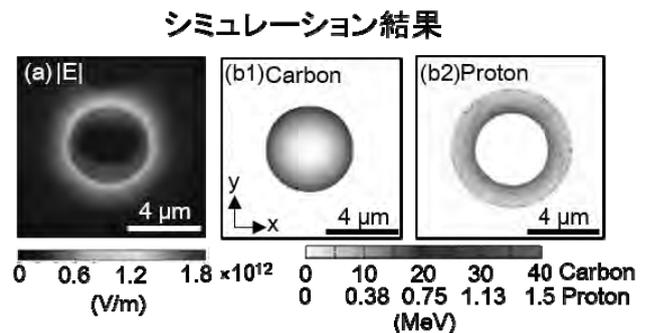


図2. レーザー入射 160 fs 後の電場強度(a)、炭素イオンの運動エネルギー(b1)、および、背景水素ガスイオンの運動エネルギー(b2) の空間分布。

[口頭発表リスト]

1. Y. Fukuda, M. Kanasaki, S. Jinno, H. Sakaki, M. Nishiuchi, A. Ya. Faenov, T. A. Pikuz, H. Kiriyama, M. Kando, K. Kondo, K. Oda, T. Yamauchi, K. Morishima, Y. Watanabe, C. Scullion, A. G. Smyth, A. Alonso, D. Doria, M. Borghesi, R. Matsui, Y. Kishimoto, "Acceleration of background gas ions induced by Coulomb explosion of clusters", 6th International Conference on Ultra-High Intensity Lasers (ICUIL 2014), Goa, India, October 2014.
2. 松井隆太郎、福田祐仁、金崎真聡、榊 泰直、岩田夏弥、近藤公伯、岸本泰明、"レーザー照射されたクラスター媒質中での背景ガスイオン加速に関する研究"、日本物理学会第 70 回年次大会、東京、2015 年 3 月。

[論文発表リスト]

なし。

ナノポーラス電極での表面誘起相転移に基づく 高容量電気二重層キャパシタの開発

深見一弘¹, 木下正弘²

¹京都大学大学院工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 緒言

電気二重層キャパシタ (EDLC) やリチウムイオン電池などの蓄電デバイスは国家規模で精力的に研究が進められている。特に、高速充放電が可能であるほか、蓄電容量が高くサイクル寿命が長いデバイスの開発が進められている。光エネルギーを電気エネルギーに変換する研究は本拠点においても多く進められている。変換された電気エネルギーを必要とときに必要なだけ利用するためには、蓄電デバイスの高性能化は必要不可欠である。そのため、本拠点で光エネルギー関連の研究と蓄電デバイスの研究が情報を共有しつつ進められることは極めて重要である。

微細構造を有し高い比表面積を持つポーラス材料は二次電池やキャパシタといったデバイスに幅広く使われている。電気二重層キャパシタでは、表面へのイオン吸着により蓄電される。ナノ細孔を有するポーラス電極を用いた場合、吸着・脱離にともなって細孔へのイオンの挿入・排出を伴う。通常、イオンの挿入・排出は濃度差による拡散により起こるため、細孔そのものが拡散の阻害因子としてはたらきうる。ポーラス電極を用いた電気二重層キャパシタでは、拡散によらない物質移動により高速で高効率にイオンを挿入・排出する必要がある。

我々は過去にポーラスシリコンへの白金の置換析出を行い浸漬電位の経時変化に着目することで、白金錯イオンのサイズや孔径がイオンの浸透挙動に与える影響について明らかにした[1]。しかし、上記の研究では白金錯イオンが孔内で消費されるとともに、析出物により孔の充填状態が時々刻々変化するため、単純にイオンの浸透挙動のみを評価したとは云い難い。そこで本研究では、鎖長の異なるアンモニウム塩を含有する電解液を用い、測定した浸漬電位の経時変化を利用してポーラスシリコン電極へのイオンの浸透挙動について検討した。

2. 実験

基板として比抵抗が $0.01\text{-}0.02 \text{ } \Omega \text{ cm}$ の n-Si(100)を使用した。この基板をフッ酸溶液中 (体積比で HF : ethanol = 1 : 1.7) において 40 mA cm^{-2} の定電流で陽極酸化し、平均孔径が約 10 nm 、ポーラス層の厚さが約 $10 \text{ } \mu\text{m}$ のポーラスシリコンを作製した。ポーラス電極を超純水に浸漬させた後、超純水と等量の電解液を加え、浸漬電位の経時変化を測定した。加える電解液は $0.2 \text{ M NH}_4\text{Cl}$, $0.2 \text{ M (C}_2\text{H}_5)_4\text{NCl}$ (TEACl) および $0.2 \text{ M (C}_4\text{H}_9)_4\text{NCl}$ (TBACl) の水溶液とした。比較のため、平滑シリコン基板を電極として使用し、濃度 0.1 M の電解液に浸漬した際の浸漬電位を測定した。

3. 結果と考察

Figure 1 (a)は平滑基板を用いて測定した浸漬電位の経時変化である。いずれの浸漬電位もおおよそ等しい電位を示しており、浸漬電位を決定する平衡反応が電解液中のカチオン種に依らないことが示唆される。ポーラス電極を用いて測定した浸漬電位の経時変化を Figure 1 (b)に示す。平滑電極での結果と異なり浸漬電位の差が大きく現れた。このとき電位シフトの傾きには、イオン浸透の速さが反映されると考えられる。一般的に、イオンサイズが大きいほど濃度勾配による拡散が阻害され孔内へ浸透しにくい。しかし、TEACl と TBACl を比較すると、カチオンの大きい TBAClの方が卑な電位シフトの傾きが大きく、孔内へのイオン

浸透が速いことが示唆された。この結果は、ポーラス層への物質供給が単純な拡散のみでは説明できないことを示している。

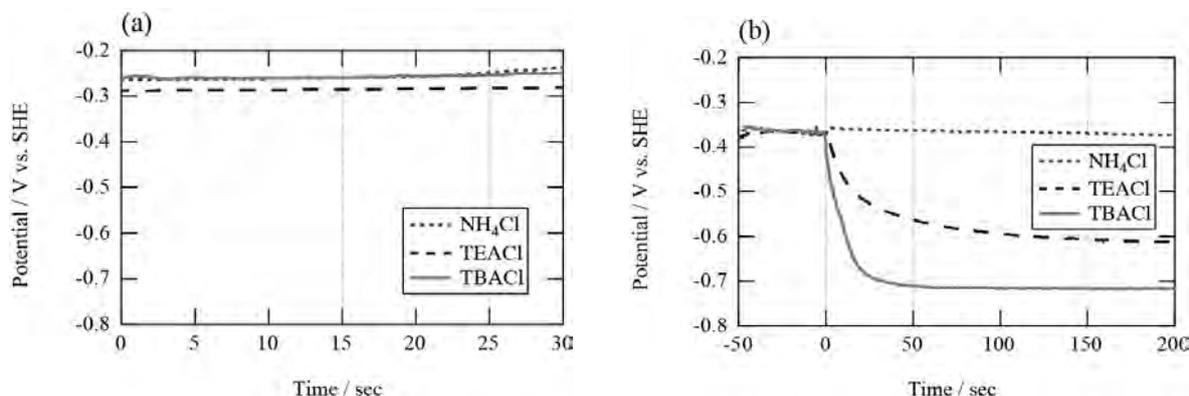


Figure 1. 浸漬電位の経時変化。(a)は平滑シリコン電極、(b)はポーラスシリコン電極をそれぞれ使用した時の結果を示す。なお(b)では、超純水に電解液を加えた時刻を 0 s とした。

ここで得られた浸透挙動は濃度差による拡散では説明が難しいものの、表面誘起相転移を考慮すると理解できる。カチオンの価数を 1 に固定し、イオンサイズを大きくすると電荷密度が低減される。その結果、水との相互作用が弱まり疎水性のポーラスシリコンと強い相互作用を示す。濃度が高い場合は表面誘起相転移が発現し、細孔内は極めて高い濃度のカチオンで満たされる。細孔内へのカチオンの濃縮効果が強い程、細孔内への浸透により強い力が働くことが期待され、Figure 1 で得られたように高速で浸透していくものと考えられる。

4. 結言

本研究ではポーラス電極を利用した電気二重層キャパシタの開発のために、細孔内へのイオンの浸透挙動について検討した。その結果、拡散の観点からは不利なサイズが大きく、電荷密度の低いカチオンがより速く浸透することが分かった。この結果は、水和の相互作用を考慮した表面誘起相転移の観点から理解することができた。今後は、実際の電気二重層キャパシタ特性を評価することを目指していく。

5. 発表リスト

[口頭発表リスト]

Yujin Imaoka, Akira Koyama, Ryo Koda, Kazuhiro Fukami, Atsushi Kitada, Kuniaki Murase, “Effect of Hydration Property of Pore Wall on Performance of Electric Double Layer Capacitors”, 226th Meeting of The Electrochemical Society, 2014 年 10 月 7 日, メキシコ (ポスター).

今岡勇仁, 小山輝, 深見一弘, 北田敦, 安部武志, 邑瀬邦明, “ポーラスシリコン電極へのイオンの浸透挙動”, 表面技術協会第 131 回講演大会, 関東学院大学

顕微分光による原子層物質の光学特性解明

宮田耕充^{1,2}, 小林 佑¹, 佐々木将悟¹, 森 勝平¹, 井上凌介¹, 犬飼恵理³,
ボアネルゲス テンディー³, 篠原久典³, 宮内雄平⁴, 毛利真一郎⁴, 松田一成⁴

¹ 首都大学東京理工学研究科

² JST さきがけ

³ 名古屋大学理学研究科

⁴ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究背景

現在、光エネルギーの高効率利用や、エネルギー消費の極めて少ない高効率電子デバイスの実現に向けて、潜在的に高いポテンシャルを有するナノマテリアルが注目を集めている。グラフェン、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMDC)等の原子層物質は、特異な低次元構造や卓越した電子輸送特性によりエネルギー変換効率の高い太陽電池や高性能薄膜トランジスタをはじめとする様々な光・電子デバイス応用が期待されている物質である。魅力的な応用が注目される一方、その物質の構造と光・電子物性などの相関関係については未だ理解不十分であり、現在でもその本質的な特性を引き出せていない。

この課題を解決するため、当研究グループでは、グラフェン、窒化ホウ素および TMDC の原子層試料について、独自の高品質試料の作製技術を確立してきた。本年度は、代表的な半導体 TMDC である、二硫化タングステン(WS_2)の単層試料に着目し、特に様々な基板上で直接成長させた WS_2 の光学特性についての研究を進めてきた。一般に、TMDC 原子層は、バルク結晶から機械的に剥離することで作製するか、化学気相蒸着法などにより基板上に直接成長させる手法がある。特に、後者の手法については、大面積薄膜が簡便に作製可能な理由などから近年盛んに研究が進められている。しかしながら、基板の種類や基板表面の構造・電子状態が、TMDC の結晶性や物性にどのように影響を与えるかなどについては不明な点も多い。このような構造・物性相関を解明するためには、様々な測定手法の特徴を生かし、電子状態を総合的に理解していく必要がある。本研究では、評価法の一つとして顕微分光・反射分光を用い、様々な基板上の TMDC 原子層について、電子構造等の情報が得られるか検討を進めてきた。

2. 実験方法

TMDC 試料としての単層 WS_2 については、薄膜硫化法や化学気相成長法によって基板上に結晶成長を行った。化学気相成長法の場合には、まず石英管内に原料となる酸化タングステン粉末と硫黄のフレイク、そして TMDC 成長用の基板を導入した。管内をアルゴンで置換した後に、電気炉を用いて基板と酸化タングステンのついて適切な温度まで上昇させた。反応温度まで電気炉が上昇した時に、上流に設置した硫黄をもう一つの電気炉で加熱を始め、アルゴンと共に硫黄の蒸気を基板に供給した。このような状況で、酸化タングステンと硫黄の供給レートが、結晶成長にとって最適になるよう温度条件を合わせることで、単層 WS_2 の結晶成長を確認した。基板としては、サファイア、石英、酸化膜付きシリコン基板、グラファイト等について検討を進めた。特にグラファイトについては、市販の高結晶性試料について、粘着テープ等を利用して試料を別の基板に剥離することで劈開面を持つグラフ

ァイト試料を固定化させた。薄膜硫化法の場合には、まず、酸化タングステンを電子ビームか抵抗加熱により真空中で蒸着し、シリコン基板等の上に成膜を行った。この基板を、同様に電気炉に導入し、硫黄雰囲気下で加熱することで TMDC の結晶成長を行った。得られた試料については、発光分光、原子間力顕微鏡、そして京都大学エネルギー理工学研究所に設置されているナノフォトン社製の顕微分光装置を使用し、反射スペクトルの取得を行った。この装置では、白色光を対物レンズで集光し、マイクロメートルサイズの局所的な領域での反射光のスペクトルを取得可能である。実験では積算時間 30 秒で、試料および参照スペクトルの取得を行った。

3. 結果と考察

図 1a に合成した単層 WS_2 の代表的な光学顕微鏡像を示す。図中で正三角形やそれらが融合したような多角形のコントラストで観察される箇所が、成長した結晶に相当する。結晶が正三角形の形状を有するのは、TMDC が特定の端構造を持つように成長することに由来する。今回得られた試料は、サイズは十マイクロメートル程度の結晶であり、原子間力顕微鏡より最薄部で厚さが 0.7nm 程度と単層の TMDC と一致することを確認した。また、発光スペクトルより、単層 WS_2 のエキシトン由来の強いピークを 2eV 付近に観測した。部分的にはあるが、二層以上の多層の WS_2 を形成した箇所も存在する。分光実験では、このような多層部を避け、単層のみからの信号を取得した。基板により、結晶のサイズや密度、層数分布にばらつきはあるが、全ての基板で同様に単層の WS_2 試料を得ることができた。図 1b に、グラファイト基板上の単層 WS_2 試料の差分反射スペクトルを示す。スペクトルは、2eV 付近で反射率が徐々に減少した後に、急激に増加するというステップ構造を持つことが分かる。この反射率の変化は、上記のエキシトン由来の発光ピークとエネルギーが一致していることから、グラファイト上の単層 WS_2 に由来する差分反射スペクトルの変化と考えられる。今回の結果は、グラファイト上という特殊な状況においても反射測定が TMDC の評価に利用出来ることを示唆しており、今後、顕微反射分光がグラファイト上で発光強度が極めて低い TMDC 試料について有用な評価法になると期待される。

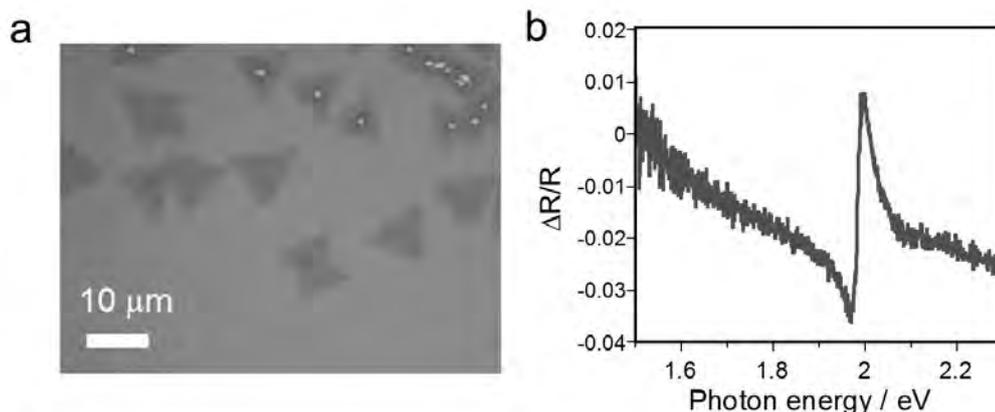


図 1. (a)シリコン基板上の単層 WS_2 の光学顕微鏡像。(b)グラファイト上の単層 WS_2 の差分反射スペクトル。

高効率な希少金属回収システム構築を目指した希少金属結合性タンパク質の DNA ナノ構造体 (DNA オリガミ) への集積化

橋本勇人¹, 黒川竜紀¹, 中田栄司², 森井 孝², 森 泰生^{1,3}

¹ 京都大学大学院工学研究科

² 京都大学大学院地球環境学堂

³ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

本研究では、生物が有する高特異的な金属結合システムを利用した、効率の良い新しいレアメタル回収システムの構築を目指す。タングステン (W) などのレアメタルは現代の社会において、コンピューター産業をはじめとする各種産業に必須な物質群であるが、その名の通り埋蔵量が少ないことや特定の地域に偏在することから、レアメタルの安定供給には低濃度試料からの高効率な回収及びリサイクルシステムの開発が急務である。

原始生物から高等生物に至るあらゆる生物は、細胞膜上の膜輸送体を用いた独自の物質収集システムを有している。これらのシステムは、レアメタルのみならず、自然界に存在する微量物質を選択的かつ高効率的に回収出来るため、新しいリサイクルシステムの開発に非常に有用なシステムである。極限環境に生息する超好熱性アーキアの中には、微量元素である W を糖代謝経路で利用する種類も数多く報告されている。W の細胞内への取り込みには、細胞膜中に存在する膜タンパク質 W トランスポーターにより選択的かつ高効率的に回収すると考えられているが、詳細は明らかになっていない。これまでの我々の研究により、超好熱性アーキア *Thermococcus kodakarensis* から新規 W 結合タンパク質 TkWtpA および TkModA を同定している。本研究では、これらタンパク質の精製方法の検討および金属結合能力の解析等を行った。

2. 方法

His-tag を付加した TkWtpA および TkModA を大腸菌に大量に発現させた後、Ni-NTA により精製した。培養温度や IPTG 濃度などや、シグナル配列の有無など検討し、最適な精製条件を確立した。金属結合能は、等温滴定型カロリメーター iTC200 により測定した。

3. 結果および考察

まず、TkWtpA と TkModA の発現量の向上を試みた。この2つのタンパク質の N 末端側にはシグナルペプチドの存在が示唆されていた。そこでこの領域を削除したプラスミドを構築し、大腸菌によりタンパク質を発現させたところ、目的タンパク質の発現量の上昇を確認することが出来た。また精製方法では、75°C で 20 分加熱処理を加えることにより、大腸菌由来のタンパク質を効率的に除去することが出来た。この加熱処理を加えた結果、Ni-NTA カラムの一段階で純度の高い精製タンパク質を得ることが出来た。(図 1)。

これら精製 TkWtpA および TkModA について、W およびモリブデン (Mo) 結合能を等温滴定熱測定 (ITC) により評価した。まず TkWtpA の Mo に対する K_D 値を測定すると 20 nM であったが、W に対する反応は結合によって生じる熱量が非常に小さく、 K_D 値を直接測定することが出来なかった。そこで、Mo で飽和させた TkWtpA に対して W による置換滴定を行うことにより K_D 値を求めると、50 pM という非常に強い結合能を示した。一方、TkModA の W と Mo に対する K_D 値はそれぞれ、7 μ M と 5 μ M であった。また、反応によって生じる熱量については、どちらの金属に対しても TkModA の方が TkWtpA よりも高かった。以上の結果より、TkWtpA は W に特異性があり、TkModA は W と Mo に同程度の結合能力があることがわかった。

TkWtpA は、精製が容易であることや、常温で安定な事、また W との結合能力が非常に高いことな

どから、W 回収システムに最適なタンパク質であると考えられる。しかし、この TkWtpA を用いて W 回収システムを構築するためには、W が結合した TkWtpA を効率良く回収することが必要である。また、高濃度の TkWtpA を使用すれば多くの W が結合出来ると考えられるが、結合効率やタンパク質の凝集など様々な問題が生じると考えられる。これらに問題を解決するため、W 結合タンパク質を DNA origami に集積化させる方法に着目した。DNA origami とは、一本鎖環状 DNA が複数の短鎖 DNA によって固定されたナノメートルサイズの高次構造体である。特徴的な DNA 配列に対して選択的に結合するジンクフィンガータンパク質 (Zif) を利用することで、金属結合タンパク質の DNA origami への配向をナノスケールで制御できる。TkWtpA をナノメートル間隔で DNA origami 上に集積すれば、タンパク質の凝集やタンパク質間の干渉による W 結合能力の低下を防ぐことが出来、かつ DNA origami があることでタンパク質の回収にも有利であると考えられる。今後は、W 結合タンパク質 TkWtpA の DNA origami への集積化を行い、W 回収システムの開発を行っていく。

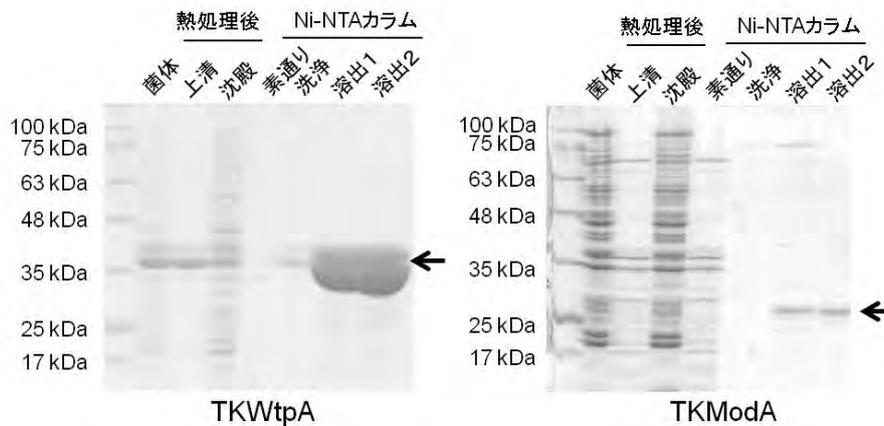


図1 TkWtpA および TKModA の精製

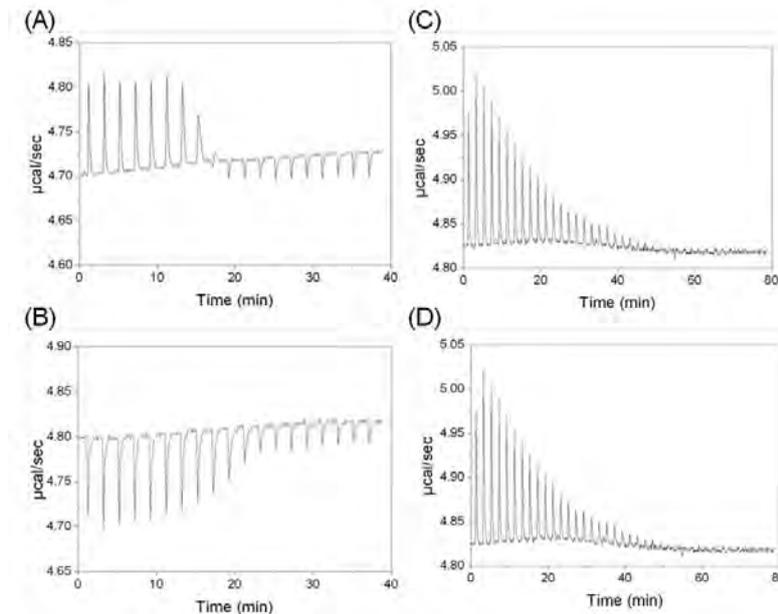


図2 ITCによる金属結合能の評価:(A)TkWtpA と Mo の結合(B)TkWtpA と W の結合(C)TKModA と Mo の結合(D)TKModA と W の結合

4. 発表リスト

該当なし

修飾塩基を特異的に認識する人工タンパク質の創製

今西未来¹, 中田栄司², 森井 孝²

¹京都大学化学研究所

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 本研究の目的

標的とする任意の遺伝子配列に結合するようデザインされた人工 DNA 結合タンパク質は、生命科学への応用のみならず、バイオエネルギーの効率的生産のための応用など、地球環境問題の解決に向けた新しい分子ツールとしても期待されている。繰り返し配列を持ち、DNA 塩基選択的に結合することが知られている植物病原菌 *Xanthomonas* 由来の転写因子様 DNA 結合タンパク質、Transcriptional Activation-Like Effector (TALE)は、その特徴的な DNA 結合様式から、任意の遺伝子配列に結合できる人工 DNA 結合タンパク質の鋳型として注目を集めている。しかしながら、TALE が結合する配列には、5'末端に T がなければならないという制限がある。また、遺伝子発現の調節に重要であるとされる修飾塩基を選択的に認識することはできない。そこで、より自在に標的配列を選択することができる TALE タンパク質を獲得することを目指して、スクリーニングを行った。

2. 方法

TALE は 34 アミノ酸からなるユニットの繰り返し領域を含んでおり、繰り返しユニットのひとつが標的 DNA の 1 塩基を認識する。各繰り返しユニットは repeat-variable diresidues (RVDs)と呼ばれる 12、13 番目のアミノ酸以外ほとんど同じ配列であり、各ユニットが認識する塩基は、この RVD によって決定される。一方、5'末端の T の認識には、繰り返しユニット類似ユニット (リピート-1) の関与が示唆されてきた。そこで、5'-T の制約を解除するために、リピート-1 の RVD 含有配列に相当するループ領域をランダム化したライブラリーを作製し、5'-T 以外から始まるレポーターベクターを用いて、Bacterial one-hybrid screening system によるセクションを行った。また、修飾塩基を選択的に認識するユニットの構築を目指して、RVD を含む周辺領域をランダム化したライブラリーを作製した。このライブラリーから、メチル化シトシン含有レポーターベクターを用いて、Bacterial one-hybrid screening system によるセクションを行った。得られた大腸菌コロニーは、それぞれシーケンスを確認し、共通するアミノ酸配列の推測を行った。また、個々の変異体タンパク質に関して、哺乳細胞内でのルシフェラーゼレポーターアッセイや試験管内ゲルシフトアッセイによって、それらの活性を評価するシステムの構築を行った。

3. 結果

5'-C もしくは 5'-A から始まる標的配列をプロモーター中に含むレポーター遺伝子を用いてスクリーニングを行った結果、図 1 に示すようなアミノ酸配列をリピート-1 のループ領域に有する大腸菌コロニーを得ることができた。231 番目のグルタミン残基は、得られたコロニー全てにおいてアルギニンに変換されていた。そこでまず、Q232R 置換体を作製してルシフェラーゼアッセイを行ったところ、活性はほとんどなかった。一方、代表的な変異を有するリピート-1 のループ領域置換体を作製してルシフェラーゼアッセイを行ったところ、5'-A/C/G から始まる標的配列への結合活性が 5'-T から始まる標

的配列への結合活性と同程度まで上昇することが明らかになった。ループ全体の構造が DNA の認識に重要であることが示唆される。また、得られたループ変異体は 5'末端塩基の種類に依存せず DNA に結合できることから、この骨格を用いることで、標的を自在に選ぶことが可能になると期待される。

また、メチル化シトシン含有レポーターベクターを用いたスクリーニングからは、比較的小さいアミノ酸を含むユニットが選択されることが明らかになった。現在、これらのユニットの詳細な活性に関して、ルシフェラーゼレポーターアッセイおよび、ゲルシフトアッセイで検討を進めている。

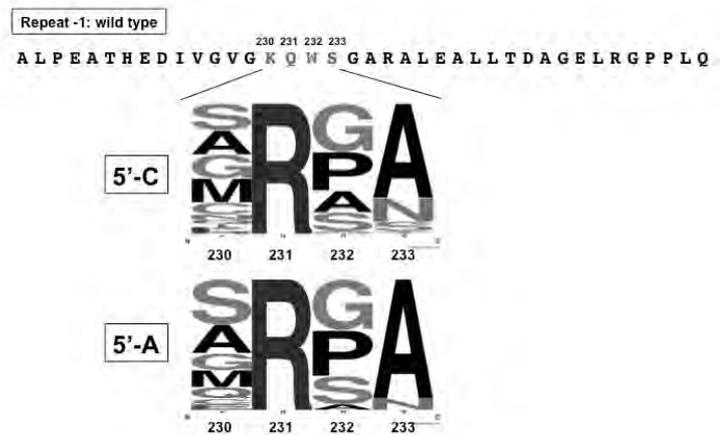


図1. 5'-C, 5'-A を有するレポーターを用いたスクリーニングの結果

[口頭発表リスト]

今西未来, ” 遺伝子発現リズムを操る人工タンパク質の創製”, 「細胞を創る」研究会 7.0, 2014 年 11 月 14 日, 東京都

Tsuji, S., Imanishi, M., Futaki, S., “Creating a TALE binding non-5'-T sequence”, FASEB SRC "Genome engineering: Cutting-edge research and application", 2014 年 6 月 25 日, Nassau (Bahamas) (ポスター)

Imanishi, M., Tsuji, S., Futaki, S., Nakata, E., Morii, T., “Design of artificial proteins targeting modified nucleic acids”, "The 5th International Symposium of Advanced Energy Science ~Contribution to Zero-Emission Energy ~", 2014 年 10 月 1 日, 宇治市 (ポスター)

辻将吾, 今西未来, 二木史朗, ” 分子進化法を用いた TALE タンパク質の機能拡張”, 「細胞を創る」研究会 7.0, 2014 年 11 月 14 日, 東京都 (ポスター)

高集積型機能性タンパク質酵素回路の構築

相澤康則^{1,2}, 松川 寛², 森井 孝³

¹東京工業大学バイオ研究基盤支援総合センター, ²生命理工学研究科

³京都大学エネルギー理工学研究所

長い進化の過程で機能性を洗練させた生命系とそこで生産されるバイオエネルギーは、現代のエネルギー問題を解決する上で、魅力的な研究対象である。そのためエネルギー生命科学分野は、バイオエネルギー生産システムを解明するとともに、その生産効率性を支えるしくみを人工的な系への抽出を試みながら、よりクリーンで人間社会での活用に適合した生体エネルギー生産システムの開発に取り組んでいる。

自然界のエネルギー生産システムの大きな特徴の1つに、異なる機能を有するタンパク質の集積化が挙げられる。これらタンパク質因子はそれぞれ様々な単一化学反応を触媒するが、あるタンパク質因子から生産された物質（原子、電子、分子など）が、隣り合った別のタンパク質因子に基質として効率よく受け渡されるため、タンパク質複合体全体としては多段階化学反応を連続的に効率よく推し進めることが可能となっている。すなわち、長い自然淘汰の進化によって洗練されたタンパク質分子

による多段階化学反応システムを活用し、効率よくバイオエネルギーを抽出するためには、異種タンパク質分子を適切な空間に配置させる技術が不可欠となる。

そこで本共同研究は、異種タンパク質をナノスケールで正確に2次元配置するための技術開発を最終的な目標としている。タンパク質を配置させる分子基盤としてDNA折り紙を用いている。DNA折り紙は、好みの塩基配列をもつ複数のDNA二本鎖を、ナノメートル単位の厳密さで空間配置することができる。我々は、このDNA折り紙上に、任意の異なる塩基配列を有する二本鎖DNAが垂直に突き出るように配置し、そこに集積させるタンパク質を配置するための橋渡し分子として、近年開発されたTALエフェクタータンパク質を用いている（図1）。TALエフェクタータンパク質は、34アミノ酸長のドメインがタンデムに連結した構造をもつタンパク質である（このTALドメインは4種類存在し、各々のドメインが4種類あるDNA塩基対の1つだけの特異的に認識することができる。よって、DNA折り紙上に突き出させるDNA配列と、集積させたいタンパク質に融合させるTALドメインが認識するDNA配列をマッチングさせることで、異なるタンパク質の相対的位置を自由自在に制御できると考え、本アイデアの検証を

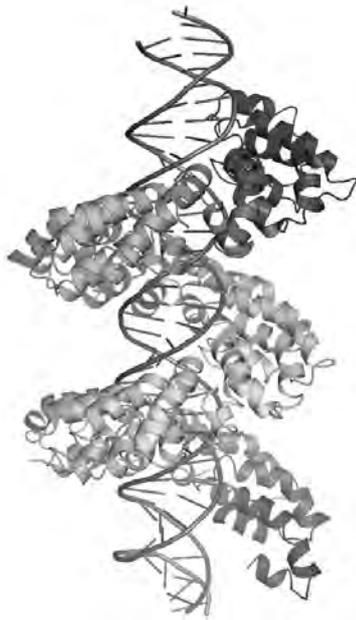


図1. TALタンパク質とDNAの結晶構造

昨年度からはじめている。

本年度は、昨年設計が完了していた2種類のTALエフェクタードメインの発現ベクターを作成した。これまでの予備実験でTALエフェクタータンパク質は、そのドメイン構成によっては、精製過程で凝集することが分かっていたため、本研究ではその危険性を避けるため、これまでにX線結晶構造解析

で3次元構造が公表されている2種類のTALエフェクタータンパク質のドメイン構成をベースに、それぞれ異なるDNA塩基配列を認識できるように設計されている (Mak *et al*, *Science* 335, 716 (2012); Deng *et al*, *Science* 335, 720 (2012))。

その後本年度はさらに、これら2種類のTALドメインにそれぞれ蛍光タンパク質(EGFPとmCherry)を融合させたタンパク質 (Mak-EGFPとDeng-mCherry) を発現するベクターの作成を完了した。その後、それらの組換え体の発現および精製を行っている。これまでのところ、Mak-EGFP組換え体の調製には成功している一方、Deng-mCherry組換え体の可溶性が低いため、可溶化の条件検討と同時並行で、TALドメインのドメイン構成の再検討も進めている。Deng-mCherry組換え体の調製後、速やかにDNA折り紙への集積を実施する予定である。

[本年度発表] 該当なし

ジルコニウム合金における添加元素と水素・酸素元素との相互作用に関する理論的研究（その2）

金田保則¹，石野 栞²，森下和功³，中筋俊樹⁴，山本泰功⁴

¹秋田工業高等専門学校自然科学系，²東京大学，³京都大学エネルギー理工学研究所

⁴京都大学大学院エネルギー科学研究科

1. はじめに

軽水炉の燃料被覆管を構成する材料としてジルコニウム(Zr)合金であるジルカロイが使用されている。ジルコニウムの問題点として、高温の条件下において冷却水あるいは水蒸気と反応して、二酸化ジルコニウムおよび水素を形成することが挙げられる。二酸化ジルコニウムは靱性が低いため被覆管の強度低下の原因となり、また、生成した水素の一部が被覆管内に侵入して被覆管の脆化を引き起こす。これらの材料劣化は、燃料の高燃焼度化を行う際の課題点の一つである。さらに、2011年3月に生じた福島第一発電所の事故では、この水-ジルコニウム反応において発生した水素が引火し、原子炉建屋は破損した。このような事故を防ぐためにも、ジルコニウムの酸化挙動をしっかりと把握することは、原子炉の安全にとって重要である。

本研究では、前年度に引き続き、ジルカロイを念頭において、その母体であるジルコニウム(Zr)金属とそれに添加される元素、外部から侵入する水素・酸素元素とのミクロスコピックな相互作用についての知見を得るため、これらの物質に対する理論的な電子状態計算を行っていた。

これまで、行ってきた擬ポテンシャル法を基にした計算、および Linear Muffin-Tin Orbital 法(LMTO法)+原子球近似(Atomic Sphere Approximation: ASA)を用いた計算の正当性を確認するために、APW法(Augmented Plane Wave 法)を基にした計算を行い、電子構造の詳細を比較した。本来行うべき Full-potential Linear Augmented Plane Wave 法(FLAPW法)を用いた計算は、現在、用いている計算機能力の不足および、コードの不具合等が生じているため、修正・改良等を行っている最中である。

2. 結果とまとめ

図1、2に、水素化ジルコニウム（正方晶 ZrH₂）に対する、LMTO-ASA法を用いたエネルギーバンド図（図1）およびLAPW法によるエネルギーバンド図（図2）を示す。横軸は、正方格子の逆格子空間における対称軸、縦軸はRydberg単位のエネルギーで、点線がフェルミレベルを表している。縦軸の絶対値は、各手法やコード作成時のエネルギー原点の取り方の違いによるものであり、本質的な違いとはならない。

LMTO-ASA法を用いた場合とLAPW法を用いた場合のエネルギーバンド図・バンド分散を比較すると、全体的にLMTO-ASA法のバンド幅が広くなっ

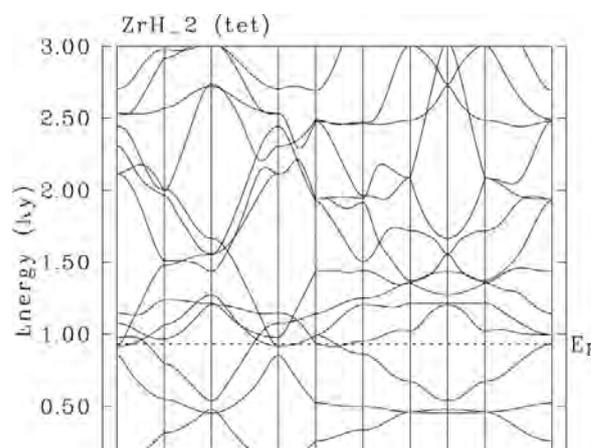


図1 LMTO-ASA法を用いた場合のZrH₂のエネルギーバンド

ている。特に Zr の 4d バンド幅は LAPW 法では狭くなっており、Zr、H 由来の s バンドとの混成も LAPW 法では小さい。

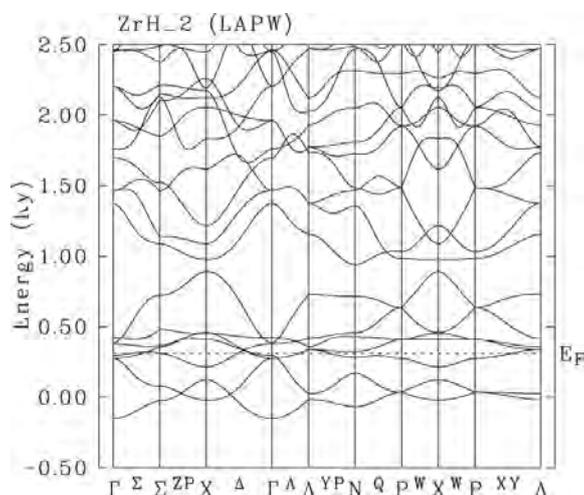


図 2 LAPW 法を用いた場合の ZrH2 のエネルギーバンド

いずれの方法による計算でも、水素の s 軌道に由来するバンドはフェルミレベル近傍に位置しており、水素原子の Muffin-Tin (原子の周りの互いに重ならない球) に対する電子数は 2 に近い値となっており、H 原子は負に帯電しているような結果が得られている。もともと、Zr 金属の自由電子的な状況の電子が水素原子に若干束縛されているような状況であることをしめしている。一方、このバンド幅の違いは電子の遍歴・局在性が異なることを示しており、金属的電子構造をもつ ZrH2 の電気的性質はもちろん、Zr 由来の電子との混成を通じた水素原子 (イオン) の構造的安定性にも強く関わっていると考えられる。LMTO-ASA 法では ASA (近似) の影響が強く出ているため、バンド幅が広がったとも考えられるが、経験的に今回のような大きな違いがみられた例はなく、また LAPW 法と線形化近似の方法も異なっており、現在このバンド幅・電子軌道混成強度の異なる理由を調査中である。

これまでの計算から、Zr 金属中に水素原子が侵入した場合、Zr の s,d 電子が自由電子的に振舞っている環境下では水素原子は電子吸着原子として働き、Zr の完全結晶中では格子間の空間的に広く空いた領域が安定的位置と考えられる。一方、空孔が存在した場合、たとえ単原子空孔でも水素原子に対しては十分大きな空孔であり、空孔中心は逆に不安定な位置となる。ちょうど表面に原子が吸着するように、水素原子も Zr 原子に近い位置に安定位置を持っていると考えてよい。

Zr の完全結晶中での格子間位置に水素原子が侵入した場合その安定位置は単位格子に対しては二つで、理想的には ZrH2 を形成する。この場合、格子に非対称性 (対称性の変化・低下) や体積膨張が生じるわけであるが、問題はさらに水素原子が過剰に侵入した場合、これによって生じる格子の変化がちょうど原子空孔を形成するように格子を歪め、より過剰な水素原子の侵入を促進するような非線形な水素化 (水素蓄積) の変化が期待される。これは、水素原子による非可逆的な格子欠陥生成メカニズムの一つではないかと予想され、いままで盛んに計算が行われている格子間侵入型水素を含んだ Zr 金属の電子状態計算と、空孔内水素を含んだ Zr 金属の電子状態をつなぐモデルが構築できる可能性がある。今後、このような計算を念頭に電子構造計算を進めていく予定である。

Irradiation-induced microstructural evolution and swelling of 3C-SiC

Ji-Jung Kai¹, Yan-Ru Lin^{2,3}, Sosuke Kondo⁴, Tatsuya Hinoki⁴

¹ City University, Department of Mechanical and Biomedical Engineering, Hong Kong

²Department of Engineering and System Science, National Tsing Hua University, Taiwan

³National Synchrotron Radiation Research Center, Hsinchu, Taiwan

⁴Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Japan

1. Abstract

Cubic silicon carbide (3C-SiC) is a promising structural and cladding material, and is used in fusion reactors and advanced fission reactors due to its attractive mechanical and thermal properties. Even though several studies have reported the irradiation-induced microstructural evolution and swelling of SiC, the contribution of defects to the swelling of irradiated 3C-SiC is less understood. If left unchecked, the swelling resulting from voids or point defects may lead to unwanted degradation of the mechanical properties of 3C-SiC. Therefore, in order to use SiC in nuclear reactor, a fundamental understanding of the swelling and microstructural evolution of this material is crucial.

2. Experimental

The material used for this work was single crystal 3C-SiC wafer which was produced by chemically vapor deposition by NOVA SiC. The thickness of SiC epitaxy layer and Si substrate are 1.1 and 450 μm , respectively.

Ion beam irradiation was performed at the DuET facility at Kyoto University, Japan. 5.1 MeV Si^{2+} ion with a fluence of 5.65×10^{17} ion/ cm^2 was implanted for inducing displacement damage at irradiation temperatures of 400, 600, 800, 1000, 1200, and 1350 $^\circ\text{C}$. The implanted Silicon profile was simulated with SRIM program. Details were shown in Fig.2.

The microstructural evolution was estimated using Synchrotron based XRD and TEM. Synchrotron XRD was performed at wiggler beam-line BL-17B1 in the National Synchrotron Radiation Research Center (NSRRC), Taiwan. The TEM used in the present study was JEOL-2010F and Cs-corrected STEM (JEOL, JEM-ARM200F) at an accelerating voltage of 200 kV.

3. Results and discussion

Fig. 2 shows electron micrographs on the evolution of defects with different temperatures. In Fig. 2(a), the main kind defect is black spot defect at 400 $^\circ\text{C}$. When temperature up to 600 and 800 $^\circ\text{C}$ (Fig. 2(b) and (c)), the main defect type is also black spot defect, but can observe some dislocation loop, too. In Fig. 2 (d), (e) and (f), the size of loop on the $\{111\}$ plane becomes larger, but density becomes lower as the temperature increasing above 1000 $^\circ\text{C}$.

Fig. 3 shows a Cs-corrected STEM images of individual silicon and carbon atoms by the annular bright-field (ABF) method. Two types of irradiation-induced planar defects were observed in the ABF images including the extrinsic stacking fault loop with two offset Si-C bilayers and the intrinsic stacking fault loop with one offset Si-C bilayer.

Interplanar spacing data of single crystal 3C-SiC was measured by using synchrotron XRD radial scan. Synchrotron XRD radial scan measurements reveals that humps on the right side of SiC(002) were observed, which suggested that $\text{C}^+/\text{Si}^+-\text{Si}\langle 100 \rangle$ and/or $\text{C}^+/\text{Si}^+-\text{C}\langle 100 \rangle$ dumbbells gave rise to diffuse scattering. The results show as the Fig.4

4. List of published paper in 2014

- (1) Yan-Ru Lin et al., "Swelling of ion-irradiated 3C-SiC characterized by synchrotron radiation based XRD and TEM", *Journal of Nuclear Materials*, vol.455, pp.292-296, 2014
- (2) Y. R. Lin et al., " Atomic configuration of irradiation-induced planar defects in 3C-SiC", *Applied physics letters*, 104, 121909, 2014

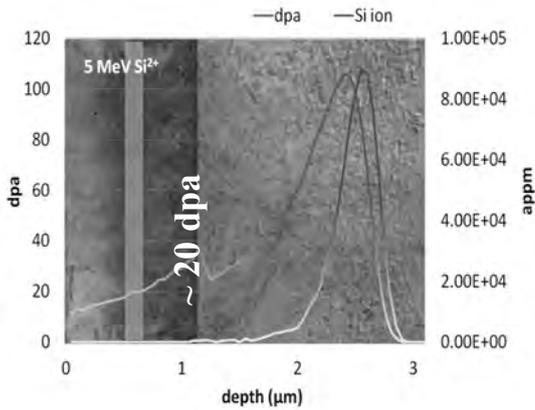


Fig. 1 Depth profile of atomic displacement damage profile with TEM cross section image.

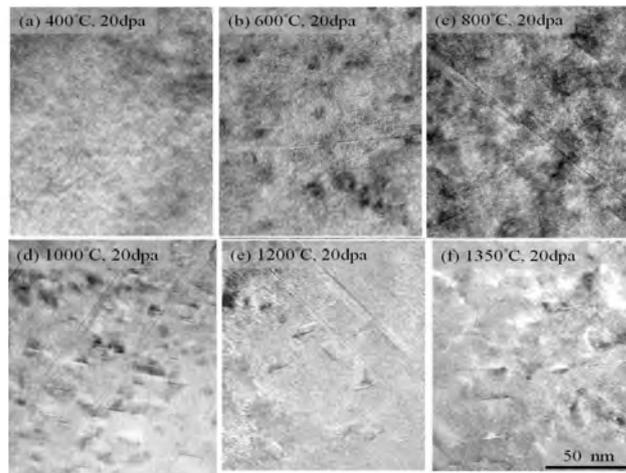


Fig. 2 TEM images of irradiated 3C-SiC taken along the <110> incident beam direction at (a) 400°C, (b) 600°C, (c) 800°C, (d) 1000°C, (e) 1200°C, and (f) 1350°C under 20 dpa.

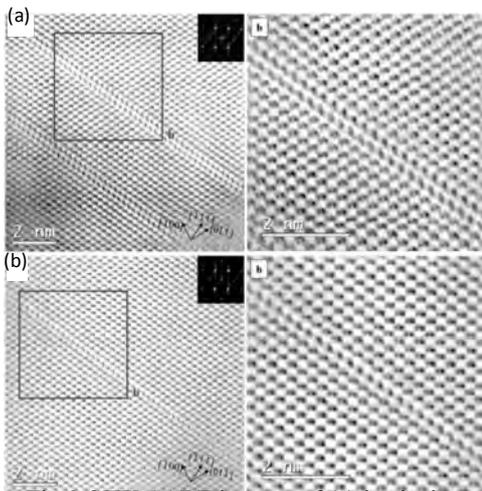


Fig.3 STEM ABF images of (a) intrinsic stacking fault loops and (b) extrinsic stacking fault loops

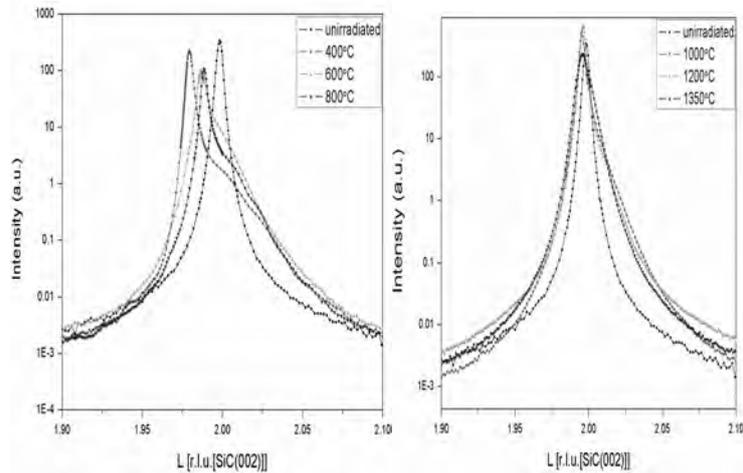


Fig.4 Synchrotron XRD radial scan peak in (002) (a) 400 ~ 800°C (b) 1000 ~ 1350 °C

Hybrid Solar Energy Research suitable for Rural Electrification

Hew Wooi Ping¹, Hideaki Ohgaki²

¹UM Power Energy Dedicated Advanced Centre,
University of Malaya

²Institute of Advanced Energy, Kyoto University

1. Introduction

This research focuses on the investigation of combining solar system with other renewable sources such as hydro or wind suitable to be installed at rural areas of Malaysia for electricity generation. We have identified 3 sites in Malaysia as the test site for installation of the hybrid solar-hydro system. These sites are located in Raub, Long Pasia and Menyang Tais.

2. Renewable Energy System and Implementations

A hybrid wind solar air exhaust air recovery system has been constructed. This system consists of a vertical axis wind turbine (VAWT), a solar panel array, inverters, batteries and a control unit. An enclosure with 2 diffuser-plates and guide-vanes was used to increase the wind velocity as Malaysia lies on belt near the equator with a low wind speed. This system has been installed in a factory in Sungei Buloh to test its effectiveness. The factory, Truwater Sdn. Bhd. , assisted in fabrication of the wind turbine and provide a tower to install the vertical wind turbine.

A 3 kW pico-hydro system has been installed in a poultry farm in Raub which is located in remote area without grid connection. The poultry farm is currently using a diesel generator and a 10 kWp solar panel as the energy source. The hydro system will serve as a low cost alternative energy source to the diesel generator.

A 5 kW pico-hydro system has been installed in Long Pasia which is a Lun Dayeh (a native of the Borneo island) village with around 80 houses. The government of Malaysia has already installed solar home system for all houses built before 2012. However, many of these solar home systems are not functioning properly at the moment because many of the storage batteries are faulty and some of the battery chargers are damaged. The pico-hydro will supplement the existing functioning solar panels. The pico-hydro system installed is a floating hydro system which floats on a river next to the village. A talk on how to maintain solar system had been given to the villagers in Long Pasia. A pico-grid that can connect all the available energy sources together is being studied. The feasibility of an AC pico-grid vs a DC pico-grid is currently being investigated. Prof. Hew Wooi Ping had been invited to present the research works done in Long Pasia in the Smart Village workshop organized by the Science Academy of Malaysia on 28 Jan 2015 in Kuching, Sarawak.

3. Pre-Research on Iban longhouse

The researchers had also made a survey on the energy requirement of an Iban (another native tribe of Borneo Island) longhouse in Menyang Tais. (Fig.1) The longhouse currently depends on 2 units of 10 kW diesel generators as the energy source. However the transportation cost of the diesel fuel is very high because the longhouse is very far from the nearest town. The diesel generators also experience frequent breakdown due to lack of proper maintenance. A hybrid solar-hydro system is currently being planned. Especially small pump and storage system is considered to develop in this cooperation research.

Pre-research in Menyang Tais has been carried out in November 26, 2014 by Prof. H. Ohgaki and Prof. Hew Wooi Ping. According to the field study and interview with chief of Iban the longhouse in Menyang Tais (Fig.2) is identified as a suitable location for the research on some effects of electrification on the lifestyles of the inhabitants because the Ibans staying in the longhouse are still keeping the traditional animist practices and the inhabitants are just hunters and farmers. There is no electricity supply because of the frequent breakdown of the diesel generators and the high diesel cost. The methodology of further research would be a group of researchers will stay with the longhouse community for about a month to document their daily lives and traditional practices. Meanwhile another group of researchers will design and install a hybrid hydro-solar system to supply electricity to the longhouse. The electrification process will take about 1 year. Then the researchers will document the changes in economic activities and cultural behavior for a period of one year. A few more Iban longhouse communities near Menyang Tais will also be documented as a comparison. From the documented facts, this research will deduce the best ways of preserving traditional cultures with the inevitable electrification process.



Fig.1 Iban longhouse in Menyang Tais



Fig.2 Interview with chief of Iban

4. Conclusion

We have developed a hybrid wind solar air exhaust air recovery system has been constructed. This system consists of a vertical axis wind turbine (VAWT), a solar panel array, inverters, batteries and a control unit. A 3 kW pico-hydro system has been installed in a poultry farm in Raub and a 5 kW pico-hydro system has been installed in Long Pasia. The feasibility of an AC pico-grid vs a DC pico-grid is currently being investigated.

Pre-research in Menyang Tais has been carried out in November 26, 2014 by Prof. H. Ohgaki and Prof. Hew Wooi Ping. According to the field study and interview with chief of Iban the longhouse in Menyang Tais is identified as a suitable location for the research on some effects of electrification on the lifestyles of the inhabitants.

核融合炉複合照射環境下におけるタングステン中の水素同位体挙動

上田良夫¹, H.T. Lee¹, 上畑和樹¹, 木村晃彦²

¹大阪大学大学院工学研究科

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 研究目的

高融点・高熱伝導率を持つタングステンは、核融合炉壁材料の第一候補材であるが、水素同位体・ヘリウム混合プラズマ、及び中性子が同時に照射される炉内環境での材料変化やトリチウム蓄積特性はまだ十分に解明されていない。そこで本研究では、大阪大学が所有するイオンビーム装置、及びエネルギー理工学研究所のDuET装置や様々な材料分析装置を利用して、このような複合照射環境下におけるタングステン材料の水素同位体吸蔵特性を研究し、タングステン材料中のトリチウム定量管理のための基礎データを収集し、さらには核融合炉壁におけるトリチウム吸蔵量を評価するためのモデルの作成を目的とする。本研究により、核融合炉でタングステン壁材料を使用する場合のプラズマ制御に対する要請が明らかになり、さらに、複合照射環境下で使用できるタングステン材料の開発に貢献することができる。なお本研究では、DuET装置や、高性能の材料分析装置を使用することが不可欠であり、本拠点で実施することが必要である。

2. 実験方法

2000℃、1時間熱処理をした再結晶Wに、DuET装置を用いて6.4MeVのFeイオンを473 Kで照射し、約1.8 μmの深さまで損傷を与えた。損傷の深さ分布を図1に示す。ピークでは約0.7dpaの照射損傷となる（SRIMコードによる計算、はじき出しエネルギーを90 eVとした）。この照射損傷を与えたタングステンに対して、473 Kで1keVの重水素（軽水素）イオンを、 $1.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ のフルエンスまで照射し、その後軽水素（重水素）イオンを同じ温度・エネルギー条件で照射して同位体交換を異なった水素同位体イオン種の順番で行った。このフルエンスまで照射することにより、吸蔵量が飽和することは確認している。

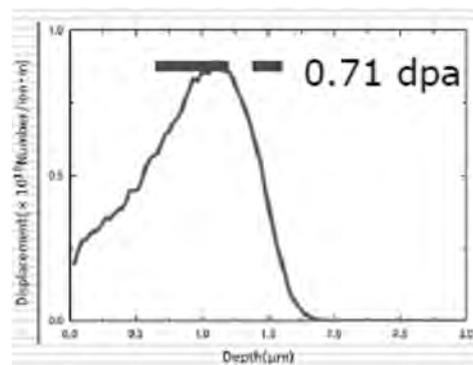


図1 6.4 keVのFeイオンによる損傷分布

水素同位体吸蔵量の測定には、昇温脱離法を用いた。差動排気型の昇温脱離装置を採用し、昇温脱離を行う加熱室の真空度を 10^{-7} Pa 程度まで下げ、十分なベーキングを行うことで、水素のバックグラウンドレベルを低減し、軽水素と重水素の同時計測を可能とした。脱離量の校正には、軽水素と重水素の標準リークを利用した。

3. 研究成果

図2にD→H、またはH→Dの同位体交換実験の結果を示す。最初に水素同位体を $1.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-2}$ を473 Kで注入したのみの場合の昇温脱離スペクトルを見ると、イオン照射温度(473 K)から、約950 K程度まで放出が見られる。重水素と軽水素の場合で大きな違いはない。なお、高エネルギーイオンで損傷を与えていない試料についても同様の実験を行ったところ、750 K近傍のピークは高エネルギーイオン照射損傷によるものではなく、低エネルギーの水素同位体イオンの注入により発生したものであるとわかった。高エネルギーイオンの影響は、おおよそ800 K以上の温度領域で見られ、今後の実験ではさらに損傷量(dpa)を増やして実験を行う予定である。

最初に入射したイオンと異なったイオン種を注入すると同位体交換により、追注入したイオンが蓄積し始める。最初の注入量の1/3のフルエンスを注入することによりすべての温

度領域で、同位体交換が観測された。しかしながら、特に低温で放出される成分について同位体交換が早く進む。500 K付近の放出からは、おおよそ80%近くが同位体交換された。一方、850 K付近の放出は30%程度の同位体交換にとどまった。ただ、イオンの照射温度(473 K)では放出されないような高い結合エネルギーを持つ水素同位体も、同位体交換反応で放出されることが明らかになった。

さらに追加イオンを注入し、初期の注入量と同じフル

エンスのイオン照射を行ったところ、放出温度が高い領域でも同位体交換が進んだ。850 K付近の放出では、約60%が同位体交換した。また、D→HとH→Dの同位体交換を比べたところ、ほぼ同位体交換の進み方に違いは無く、同位体交換反応において、同位体効果は小さいことがわかった。

図3に全リテンション量のフルエンス依存性を示す。D→HとH→Dの場合を比較すると、どちらも初期フルエンスまでは、同位体交換のみが進み、全リテンション量は大きな変化がない。同位体交換の効率は、70~75%程度であり、初期の注入イオンをトリチウムと仮定した場合、約3/4のトリチウムが473 Kの温度条件下で除去できることがわかった。

4. 成果発表

1. Y. Ueda et al., "Hydrogen isotope exchange at ion damaged sites in tungsten", 21st PSI, May 2014, Kanazawa Japan
2. H.T. Lee et al., "Deuterium-hydrogen isotope exchange in self-damaged tungsten studied by in-situ nuclear reaction analysis", Beam Interactions with Materials and Atoms Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B, accepted (2014)

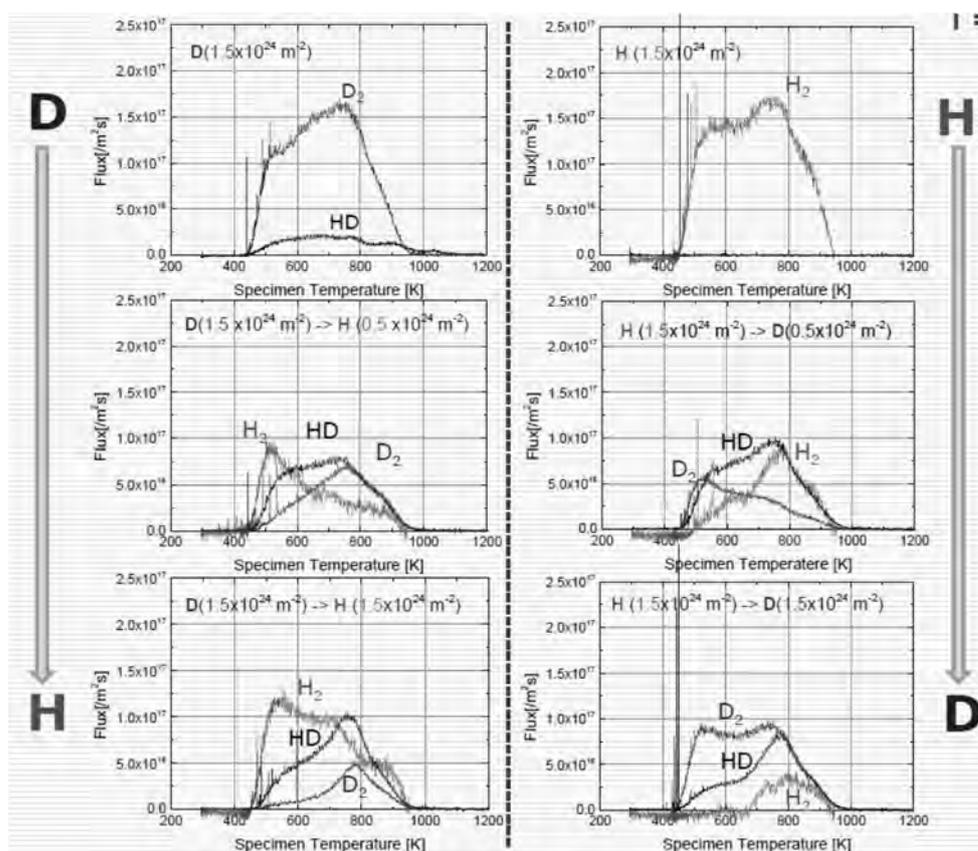


図2 D注入後Hを注入した場合のTDSスペクトル(左図)とH注入後Dを注入した場合のTDSスペクトル(右図)。

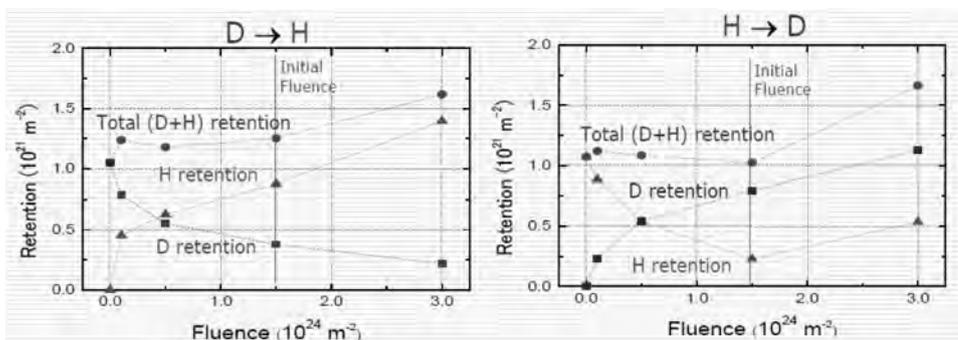


図3 全リテンションのフルエンス依存性。D注入後Hを注入した場合(左図)、H注入後Dを注入した場合(右図)。

Fe-Cr-Ni 合金中の照射損傷組織に及ぼす SFE の影響

藪内聖皓¹, 長谷川晃¹, 野上修平¹, 福田 誠¹, 近藤創介², 木村晃彦²

¹ 東北大学大学院工学研究科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景・目的

原子力発電は、発電時に CO₂ を排出しないゼロエミッション電源であり、地球温暖化防止に極めて有効なエネルギー源である。しかしながら、福島原発の事故を見てわかるとおり、その安全性を極めて高いレベルで担保することが求められる。原子炉で使用されるステンレス鋼は、中性子照射に曝されその機械特性が変化する。炉の健全性を担保するためには、機構論に裏付けされた機械特性変化の高精度な予測が求められている。特に鋼材中の格子欠陥挙動は損傷組織発達に大きな影響を及ぼすため、そのメカニズムの解明は必要不可欠である。

本研究では、損傷組織発達に影響する空孔集合体の形態（積層欠陥四面体とポイド）に着目し、その形態変化（積層欠陥四面体→ポイド）時の欠陥サイズが積層欠陥エネルギーによって説明可能であると考え、その相関を明らかにすることを目的としている。積層欠陥四面体は FCC 金属で観察され、Au の急冷などで観察されている。積層欠陥四面体は熱的に安定であるが、高温に加熱すると成長しその後消滅する。しかしながら、積層欠陥四面体の消滅過程は実験的にも理論的にも、ループの消滅過程に比べて不明の点が多い。粒子線照射下においても、FCC 金属で積層欠陥四面体の形成が確認されている。さらに、小島らは電子線照射下において積層欠陥四面体が空孔集合体であるポイドに形態を変化させることを実験的に示した。これは、積層欠陥四面体と空孔集合体のエネルギーハイラキーによるものであると考えられるが、その因子やメカニズムについては明らかになっていない。積層欠陥四面体とポイドは、同じ空孔集合体でありながら、その応力状態から、材料中の微細組織発達に及ぼす影響は大きく異なる。積層欠陥四面体→ポイドの形態変化に及ぼす因子を明らかにすることは、材料中の組織発達過程を明らかにし、予測する上で極めて重要である。

2. 実験方法

本研究では、異なる積層欠陥エネルギーを持つ Fe-Cr-Ni 合金として、Fe-10Cr-16Ni, Fe-13Cr-14Ni, Fe-19Cr-11Ni を京都大学の有するアーク溶解炉を用いて作製した(図 1)。積層欠陥エネルギーの計算値は、それぞれ、98 mJ/m², 76 mJ/m², 29 mJ/m² である。アーク溶解にて作製した試料は、熱処理後 3 mm φ ディスクに加工し、その後の試験片とした。

各試験片は、北海道大学の有する超高压透過型電子顕微鏡を利用して、照射を行い照射欠陥を導入した。照射後試験片は京都大学エネルギー理工学研究所の有する透過型電子顕微鏡を用いて微細組織観察を実施した。小島らによって、ステンレス鋼中に形成した積層欠陥四面体がポイドに形態を変えることが観察されており、同等の条件で照射下その場観察を実施し、照射によって積層欠陥四面体が形成しうることを確認する。

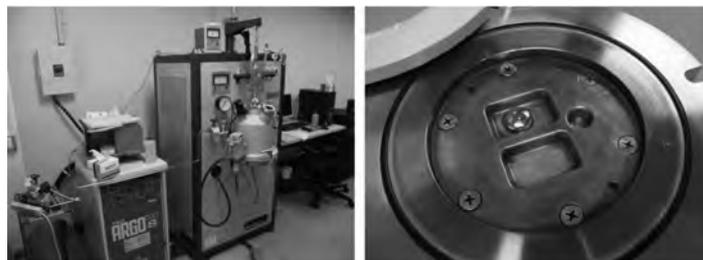


図 1. アーク溶解による試験片の作製

3. 結果・考察

加速電圧 1250 kV、電子線フラックス 4×10^{23} electrons/m² s、照射温度 573 K で電子顕微鏡内にて各試料に対して電子線照射を行った。照射後の試料は加速電圧 200 kV の透過型電子顕微鏡を用いて照射後組織の観察を行った。照射後の微細組織を図 2 に示す。図 2(a)は Fe-10Cr-16Ni、(b)は Fe-19Cr-11Ni の透過型電子顕微鏡写真で、観察された積層欠陥四面体を矢印で示している。すべての試料において積層欠陥四面体およびボイドが観察された。小島らは、Fe-13Cr-14Ni 合金を用いて積層欠陥四面体の空孔への形態の変化を報告しているが、本研究では、積層欠陥の異なる Fe-10Cr-16Ni、Fe-19Cr-11Ni についても積層欠陥四面体が形成することを明らかとした。また、積層欠陥四面体やボイド以外にも転位ループが観察された。本研究では微細な転位ループが一次元状に整列した組織や、粗大な部分転位ループが観察された。これらの微細組織発達挙動の違いについても現在調査を進めているところである。

照射下における積層欠陥四面体の臨界サイズを明らかにし、また、その臨界サイズを支配する因子について明らかにするため、京都大学の有するイオン加速器 DuET を用いた研究を進めている。DuET を用いた照射実験中の照射温度測定の様子を図 2 に示す。DuET を用いた系統的な照射実験は既に実施済みであり、現在透過型電子顕微鏡を用いた微細組織観察を実施しているところである。これらの成果をまとめ、Fe-Cr-Ni 合金中の照射損傷組織に及ぼす SFE の影響について明らかにする。

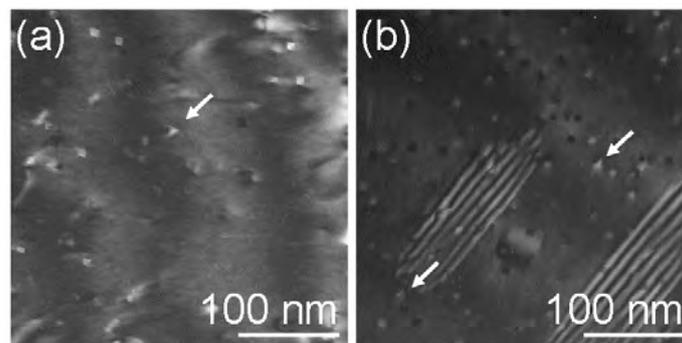


図 1 SFT の TEM 像 : (a)Fe-10Cr-16Ni、(b)Fe-19Cr-11Ni

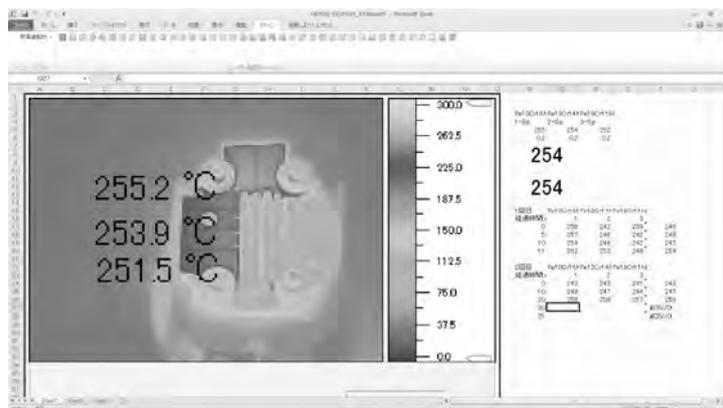


図 2 DuET でのイオン照射実験の様子

4. 本年度発表リストについて

なし

先進原子力材料としての粒子析出/分散強化型 ニッケル基合金の照射影響評価

大野直子¹, 鶴飼重治¹, 近藤創介², 橋富興宣², 木村晃彦²

¹北海道大学大学院工学研究院

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. 背景・目的

原子力発電は二酸化炭素を排出しない（ゼロエミッション）基盤エネルギーとして重要であり、高い安全性かつ高効率を目指す次世代原子炉(Gen. IV nuclear reactors)の開発が世界的に進められている。第四世代原子炉である高温ガス炉(HTR, VHTR, GFR)の炉心材には Ni 基合金の適用が検討されている。Ni 基合金は Fe 基合金に比べ優れた高温クリープ強度を有する一方で、原子炉材料として使用するにあたっては核変換 He による脆化の克服が最大の課題である。我々は耐 He 脆化を狙った Ni 基酸化物分散強化(ODS)合金の研究を行っている。本研究は、Ni 基 ODS 合金について Fe/He イオン同時照射を行い、Ni 基合金に対する ODS の耐照射特性を評価した。

2. 実験方法

PM1000 相当の組成をもつ Ni 基 ODS 合金(Ni-0.3Al-20Cr-3Fe-0.5Ti-0.6Y₂O₃)を作製し、京都大学エネルギー理工学研究所の DuET 施設を利用して Fe/He イオン同時照射を行った(1000°C, 最大 100.1dpa@照射表面からの深さ 1450nm, He 注入量 660appm)。照射後の特性変化は深さ方向の断面 TEM 観察により評価した。表 1 に、H26 年度を含めこれまでに DuET で行ってきた Fe/He 同時照射条件を示す。

表 1 Fe/He イオン照射条件

温度(°C)	損傷速度(dpa/s)	最大損傷量(@1.45μm)	He 注入量(appm)
600	1.91×10^{-3}	101	730
1000(H26 年度)	2.44×10^{-3}	100.1	660

3. 実験結果・考察

図 1 はアンダーフォーカスで撮影した照射後試験片の断面 TEM 像で、白く光る部分はキャビティである。600°C照射では全体的に微細なキャビティが緻密且つ均一に分散しているのに対し、1000°Cでは 600°Cの場合よりもキャビティの密度が低くなるのが写真から分かる。いずれの試料においても粒界へのキャビティの偏析は見られず、スウェリングはそれぞれ 1%よりも小さく抑えられた。また、1000°C照射においても 600°C照射と同様にキャビティが結晶粒内に分散した酸化物粒子と母相の界面に主に分布していることが分かる(図 1 の赤矢印)。1000°C照射では

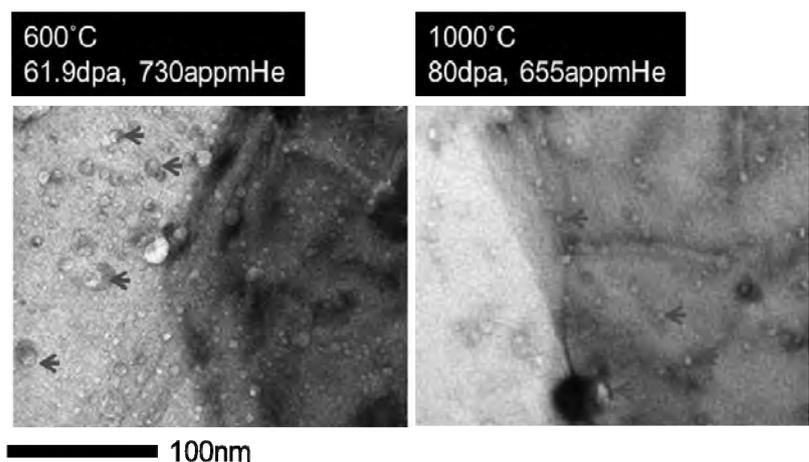


図 1 照射材のキャビティ分布(左:600°C照射、右:1000°C照射. 赤い矢印は酸化物粒子-マトリクス界面に分布しているキャビティの例.)

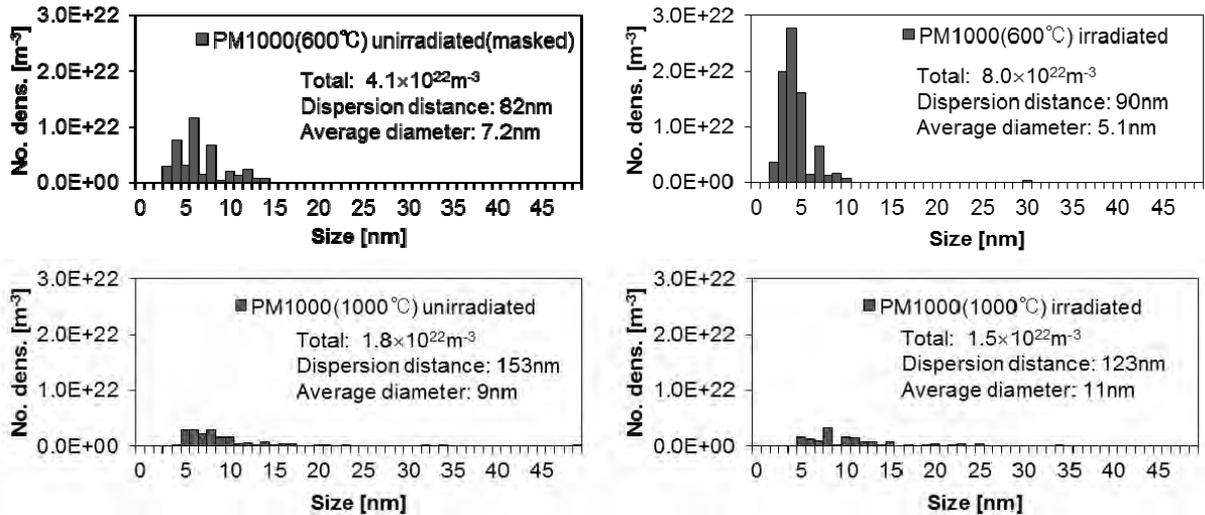


図2 非照射・照射材の酸化物粒子サイズ分布(左：非照射 右：照射)

酸化物粒子が 600°C に比べて数密度が半分以下に減少したにも関わらず、依然として酸化物粒子が空孔や He 原子の強いシンクとなることが言える。

図2に非照射・照射材の酸化物粒子サイズ分布を示す。本研究における非照射材とは、照射時のマスク部からサンプリングした観察試験片であり、照射部よりも 50°C 程度低い温度で、照射した部分と同じ時間アニーリング (600°C, 1000°C についてそれぞれ 14.2h, 11.4h のアニーリング) が施されている。照射材は 600°C, 1000°C においてそれぞれ 99.7dpa, 100.1dpa の部分でサイズ測定を行った。1000°C の実験では、11.4h のアニーリングによって非照射・照射の両方において酸化物粒子が成長した。酸化物粒子平均サイズは 600°C より約数 nm の範囲で上昇したが、数密度は半分以下に減少した。1000°C の酸化物粒子のサイズ分布は非照射・照射ともにバイモーダルとなっており、成長し易い一部の Y-Al 複合酸化物がオストワルド成長により粗大化したものと考えられる。また、100dpa の照射はアニーリングよりも酸化物粒子の分散には影響しないことが分かる。

4. 結論

Ni 基 ODS 合金について、本研究により以下のことが明らかとなった。

- 酸化物粒子は 1000°C, 11.4h のアニーリングによって粗大化した。粗大化は 600°C のアニーリングより数 nm の範囲であるが、数密度は半分以下に減少した。しかし、約 100dpa の照射は酸化物粒子の分散に殆ど影響しなかった。
- 1000°C においても、Ni 基 ODS 合金は He 環境下で優れた耐スウェリング特性を有し、且つ酸化物粒子-マトリクス界面でキャビティの成長が起きることで、粒界への He バブル堆積を防ぐ。

[口頭発表リスト]

1. 大野直子、鶴飼重治、木村晃彦、近藤創介、橋富興宣，“先進原子力材料としての Ni 基 ODS 合金のイオン照射影響評価”，日本金属学会 2014 秋期講演大会，2014 年 9 月 25 日，名古屋大学（口頭発表）。
2. N. Oono, S. Ukai, S. Kondo, O. Hashitomi, A. Kimura, “Nano-structure evolution in Ni-base ODS alloys by simulated dual Fe/He ions irradiation”, The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, 1st October 2014, Uji, Japan (Poster).
3. N. Oono, S. Ukai, S. Kondo, O. Hashitomi, A. Kimura, “Irradiation effects of Oxide Dispersion Strengthened (ODS) Ni-base alloys for Gen. IV nuclear reactors”, The Nuclear materials Conference (NuMat2014), 29th October 2014, Florida, U.S. (Poster).

酸化物/窒化物セラミックスの照射誘起微細構造 ～電子励起および選択的はじき出し損傷の効果～

安田和弘¹, 高木聖也¹ (院生), 吉岡 聰¹, 松村 晶¹, 近藤創介², 木村晃彦²

¹九州大学工学研究院

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

酸化物および窒化物セラミックスは、その耐熱性、化学的安定性および優れた耐照射損傷性により、プルトニウムや長寿命核種の削減・消滅処理のための不活性母相、次世代核燃料母相材料として期待されている。これらの材料中には高速中性子、核分裂片、アルファ粒子、電子等の種々の放射線が発生し、その運動エネルギーは弾性および非弾性相互作用を通して材料中で失われる。核分裂片は 70-100 MeV 程度の高い運動エネルギーを有するが、殆どのエネルギーは非弾性相互作用によって失われる。その際の電子的阻止能値は最大 20 keV/nm にも達し、イオン飛跡に沿ってイオントラックと呼ばれる柱状の照射欠陥が形成される。

原子炉燃料および核変換処理材料の候補材料として期待されている蛍石構造酸化物は、高密度電子励起損傷に対する高い耐性を持ち、イオントラックは非晶質とならずに蛍石構造を保つことが報告されている。しかしながら、イオントラックの構造やサイズについての詳細な理解は、現時点では不十分である。一方、原子炉燃料および核変換処理材料では多数の核分裂片が発生し、高密度電子励起損傷は重畳する。重畳回数の評価はイオントラックサイズに依存するが、直径 20 nm の円柱形状を仮定した場合、約 100 s 間隔で高密度電子励起に伴うスパイクが発生すると評価されており、これは 1 年間の使用に換算すると約 10^5 回の重畳に相当する。すなわち、原子炉燃料や核変換処理材料の核分裂片損傷を考える際には、その重畳効果を明らかにすることは極めて重要である。

本報告では、高速重イオン照射を照射した蛍石構造を有する二酸化セリウム (CeO_2) 中のイオントラック構造、ならびに高密度電子励起損傷の重畳に伴って発達する微細組織変化について報告するとともに、電子的阻止能付与がイオントラック形成のしきい値以下である 6.4 MeV の Fe イオンを照射した CeO_2 の微細組織変化と比較して報告する。

2. 実験方法

CeO_2 粉末 (レアメタリック社製, 純度 99.99 %) を一軸加圧および静水圧加圧成型により整形した後、大気中で焼結し、 CeO_2 焼結体を作製した。作製した焼結体に整形、研磨を施し、京都大学エネルギー理工学研究所の DuET を用いて、板面に垂直な方向から 6.4 MeV の Fe^{3+} イオンを照射した。照射は 873 および 1273 K で行い、照射量 3.0×10^{18} および 1.2×10^{19} ions/m² とした。高速重イオン照射は、日本原子力研究開発機構東海研究所のタンデム加速器を用いて、200 MeV Xe イオンを室温にて照射した。電子顕微鏡観察を行った試料表面付近における 200 MeV Xe イオンの CeO_2 中の電子的阻止能は 27 keV/nm であり、イオントラック形成に対する電子的阻止能のしきい値 (約 15 keV/nm) を超えている。

イオン照射後の試料を機械研磨およびイオン研磨により薄膜化し、電子顕微鏡観察に適する薄膜試料を作製した。微細構造観察は透過型電子顕微鏡(JEM2000-HC)、および走査透過電子顕微鏡(JEM-ARM200F)を用いて、加速電圧 200 kV にて行った。

3. 結果および考察

図 1 は、200 MeV Xe イオンを照射した CeO_2 中のイオントラックをイオン照射方向から観察した高角散乱環状暗視野 (HAADF) 像である。図 1 より、高分解能 HAADF 像から評価したイオントラックサイズは、直径 3-4 nm であり、これは明視野像で観察されるイオントラックサイズとほぼ一致する。さらに図 1 より、イオントラック中心領域は蛍石構造を保っているものの、その信号強度は低下しており、イオントラック中心領域の原子密度が低下していることを示唆している。図 2 は、イオントラック面密度の照射量依存性を示している。 10^{12} cm^{-2} 以上の照射量ではイオントラック密度は飽和しており、イオントラックの形成と回復が平衡していると考察される。面密度-照射量の関係 (図 2) の解析から、回復に影響を与える領域のサイズは直径 17 nm と評価され、そのサイズは電子顕微鏡観察の結果よりも著しく大きいことがわかった。イオントラック (あるいは高密度電子励起損傷) の形成と回復が重畳する高照射領域では、転位組織や微細結晶粒などの微細構造が発達する。このような微細組織は、6.4 MeV の Fe^{3+} イオン照射により発達する転位組織と類似したものである。講演では、高密度電子励起損傷の重畳によりこのような微細構造変化が生じる過程について考察する。

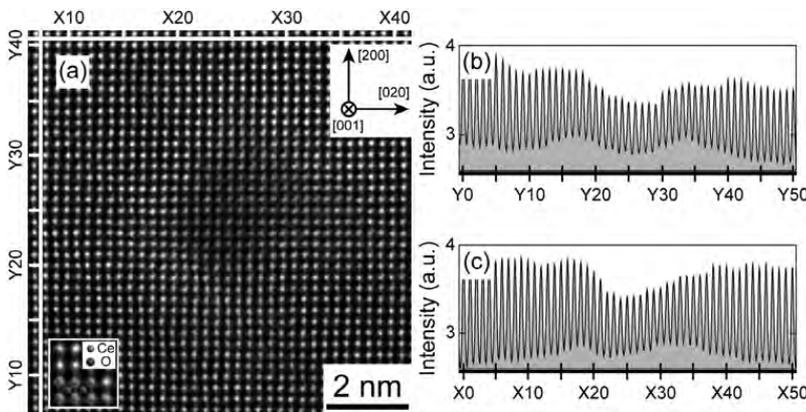


図 1 High resolution HAADF-STEM image of CeO_2 taken from the [001] direction including an ion track (located at the center of the micrograph) formed under 200 MeV Xe ion irradiation to a fluence of $3 \times 10^{12} \text{ ions/cm}^2$ (a). Signal intensity profiles including an ion track are shown in (b) and (c), respectively, for band regions from X20 to X30 (b), and from Y20 to Y30 (c).

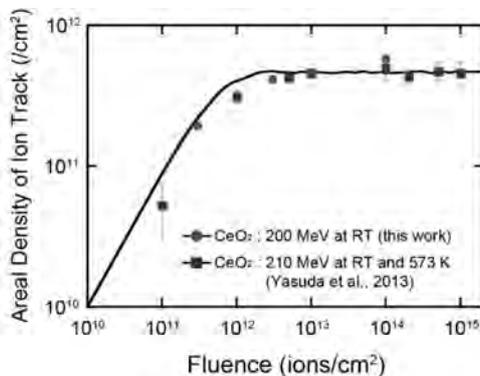


図 2 Areal density of the core damage regions of ion tracks in CeO_2 as a function of 200 MeV or 210 MeV Xe-ion fluence. A curve shown is the fitted result to reproduce the experimental data using an numerical simulation described in Ref. (1), to give an influence radius of 8.4 nm. Data indicated by squares were obtained at an ambient temperature (1×10^{11} , 1×10^{12} , 5×10^{12} and $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) and at 573 K (other data points). Data with 200 MeV Xe-ion irradiation (circles) were obtained at an ambient temperature.

低放射化鋼の機械的特性におよぼす温度と組織の影響

木下博嗣¹, 實川資朗¹, 鈴木茂和¹, 木村晃彦², 近藤創介²

¹ 福島工業高等専門学校

² 京都大学エネルギー理工学研究所

1. 目的

新たに開発した、2種のNiを含まない低放射化フェライト-マルテンサイト二相鋼を試料として、熱処理による機械的特性変化を明らかにすることを目的に、3種の熱処理後、ビッカース硬度試験、微小試験片による引張試験を行った。その後、走査型電子顕微鏡(SEM)により引張試験片の破断面の観察、光学顕微鏡による組織観察を行った。熱処理と組織の変化、組織と強度の相関について検討を行った。

2. 試料および実験方法

本研究では、添加元素の異なる2種の二相鋼を試料とした。その組成を表1に示す。試料の記号として、K4、K5とする。

表1 Niフリー低放射化鋼の組成(wt%)

	C	Cr	V	Ta	N	W	Fe
K4	0.14	11.71	0.2	0.09	0.033	2.16	bal.
K5	0.14	11.19	0.2	-	0.027	2.16	bal.

熱処理は、電気炉により900℃で30分間加熱した後、水中への急冷、室内での空冷、加熱を停止した電気炉中での炉冷とした。また、比較のためにas-received材を含め4種類の試料を製作した。入手した材料は、半径9mm、長さ80mmの丸棒である。従って、試験片形状は、平行部の長さL=5mm、幅W=1.2mm、厚さT=0.5mmである微小試験片とした。また、引張方向が試料の押出方向となるよう加工した。加工には放電加工機を用い、引張試験表面は傷の影響を最小限にするために、バフ研磨まで行った。また、ビッカース硬度計により硬度変化も測定した。引張試験後の破断面は、SEMによる観察を行った。組織については、王水で腐食後、光学顕微鏡で検討した。

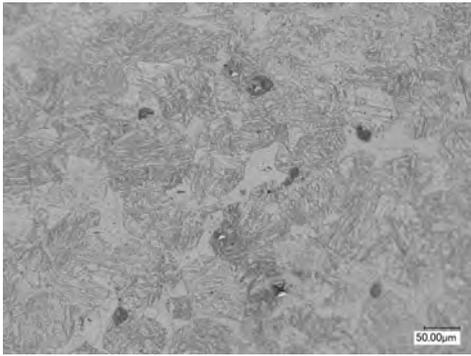
3. 実験結果

実験結果は、より高い硬度、および引張強度を示したK4試料について述べる。K4試料のビッカース硬度試験の結果を表2に示す。

表2 K4の平均ビッカース硬度

	as-received	急冷	空冷	炉冷
平均HV	545	462	454	384

炉冷の試料は、硬度の低下が認められたが、急冷、空冷についてはほぼ同じ値となった。光学顕微鏡観察の結果を図1に示す。急冷後組織で、コントラストの白いフェライトと、灰色のマルテンサイトの2相に分離しているのが明らかである。



空冷、炉冷の場合も、ほぼ同様な組織を示しているが、冷却速度が遅くなるほどフェライト相の割合が増加する傾向が認められた。引張試験の結果を表 3 に示す。冷却時間の増加に伴い、引張強度の低下、伸びと絞りの増加が認められる。

図 1 K4 試料の急冷後の組織写真

表 3 K4 の引張特性

	as-received	急冷	空冷	炉冷
引張強さ(MPa)	1429	1207	1168	877
全伸び(%)	13.6	16.1	18.6	18.6
絞り(%)	12.0	13.9	16.4	15.7

引張試験後の SEM 観察結果では、脆性破壊と延性破壊の両方の破断面が混在していた。K4 試料の急冷後引張試験片の破断面 SEM 写真を図 2 に示す。

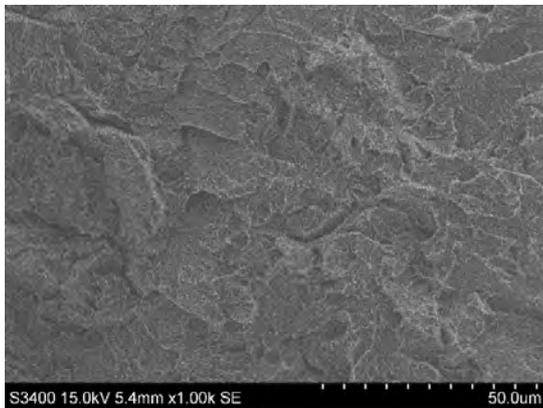


図 2 K4 試料の破断面 SEM 画像

4. 結論

本研究の結果、本二相鋼は、高い強度と良好な伸びを有していることが明らかとなった。また、熱処理により目的とする強度、伸びを得られる可能性が有る。

ヘリオトロン J 装置における輻射輸送コードの開発

川染勇人¹, 門信一郎², 西野信博³, 水内 亨²

¹ 香川高等専門学校情報工学科

² 京都大学エネルギー理工学研究所

³ 広島大学大学院工学研究院

1. はじめに

プラズマ磁場閉じ込め装置や将来の核融合炉におけるダイバーター領域は、ヘリウム高密度プラズマであり、その光学的厚さから輻射再吸収が無視できなくなり、その影響を正しく取り扱わないとプラズマ中での粒子輸送をモデリングすることはできない。したがって、輻射輸送を考慮したシミュレーションコードの開発が必要不可欠である。また、開発したシミュレーションコードの検証は、実験データとの突き合わせを行うことが効果的であるが、吸収が大きい共鳴遷移の発光波長は真空紫外から X 線域にあるため、実験的に調べるには、それなりの工夫が必要となる。だが、電子温度・密度や可視分光器、真空紫外分光器等の測定系を有するヘリオトロン J 装置においては、比較的速やかに真空紫外分光器による測定を実施することができる。

そこで、本研究ではヘリオトロン J プラズマにおける輻射輸送コードを開発して、シミュレーション結果と真空紫外分光測定の結果とを比較して、ヘリウム原子密度を正確に評価することを目的とする。加えて、本研究では、綿密な実験計画に基づいて得られた結果と、実験条件を的確に再現したシミュレーション結果とを比較検討することにより、その妥当性が評価された分光診断法を確立することができる。現在、輻射再吸収を考慮した場合のシミュレーションは、衝突輻射モデルと輻射輸送方程式を組み合わせたものを用いて行っており、得られる結果は準定常状態でのものである。一方、本研究では、従来の衝突輻射モデルに変わり、連立レート方程式を用いている。この手法により、占有密度や輻射場の時間変化をシミュレートすることができて、従来の手法では分からなかったプラズマのダイナミクスを理解することが可能となる。この理解により、核融合炉内で発生するヘリウム原子をダイバーター領域で制御するための新たな知見を得ることができる。

2. シミュレーションコードおよび実験方法

本研究で開発するシミュレーションコードには、ヘリウム原子のエネルギー準位 p におけるレート方程式¹⁾

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_p}{dt} = & - \left\{ \sum_{q \neq p} C_{pq} n_e + S_p n_e + \sum_{q < p} A_{pq} \right. \\
 & \left. + \frac{4\pi}{c} \sum_{q > p} \int_{line} B_{pq} I_{qp}(\nu) P(\nu) d\nu + \frac{4\pi}{c} \sum_{q < p} \int_{line} B_{pq} I_{pq}(\nu) P(\nu) d\nu \right\} n_p \\
 & + \left\{ \sum_{q \neq p} C_{qp} n_e + \sum_{q > p} A_{qp} \right. \\
 & \left. + \frac{4\pi}{c} \sum_{q > p} \int_{line} B_{qp} I_{pq}(\nu) P(\nu) d\nu + \frac{4\pi}{c} \sum_{q < p} \int_{line} B_{qp} I_{qp}(\nu) P(\nu) d\nu \right\} n_q \\
 & + (\alpha_p n_e + \beta_p + \beta_p^d) n_i n_e
 \end{aligned} \tag{1}$$

を各準位に対して適用して、それらを連立させたものを支配方程式として用いる。この連立レート方

程式の時間発展と輻射輸送を組み合わせることで反復計算により得られた定常解より、各エネルギー準位の粒子密度を求める。加えて、空間的に輻射を伝搬させるために、ヘリオトロン J 装置に対する空間メッシュや計算領域のモデリングを行う。

実験との比較においては、電子温度、電子密度の空間分布が必要となり、トムソン散乱による測定が最も正確であるが、装置の状況等により、それが困難な場合は、可視分光器による測定により求める。さらに、真空紫外分光器によるスペクトル測定を行う。また、測定した線強度をシミュレーション結果と比較するためには強度の絶対値が必要となるが、分岐比法等による真空紫外分光器の絶対感度校正を行う必要がある。また、実験結果との比較検討の課程において、必要に応じて、粒子輸送を考慮したシミュレーションコードへの改良を行う。

3. 可視分光器システム・真空紫外分光器システムの開発

本研究では輻射吸収量を定量的に評価することが重要である。そのためには、分光器システム、特に真空紫外分光器システムの絶対感度校正が必要である。通常、真空紫外分光器の感度校正には標準光源として放射光が必要となるが、現在、ヘリウム原子輝線強度比法のための低分散・高スループット可視分光器システムの開発が行われている。その分光器システムの開発が完了することにより、ヘリオトロン J 装置の放電プラズマを用いて、可視分光器システムや他の測定システムとの測定結果（電子温度や電子密度等）とを組み合わせ、真空紫外分光器システムの絶対感度校正を行うことが可能となる。また、ヘリウム原子の挙動が顕著に反映される発光ライン（ヘリウム原子の共鳴線）を調べることが効果的であるが、ヘリオトロン J 装置に既設の真空紫外分光器の回折格子の測定領域では、共鳴線を測定することができない。よって、VLSG 回折格子の取り替えや、新たな真空紫外分光器システムの設計・開発を行う必要がある。

4. まとめ

ヘリオトロン J 装置においてヘリウム原子に関する輻射輸送コードの開発を行うことを目標として、本年度は、分光器システムを初めとする計測システムの現状の調査、および可視分光器システムの開発を行い、本研究の目標の設定の妥当性を検討した。その結果、可視分光器システムを用いて、真空紫外分光器の絶対感度校正が可能なが分かった。今後は、分光器システムの絶対感度校正の実施と新たな真空紫外分光器システムの設計・開発の検討を行う予定である。

5. 参考文献

- 1) S. Kado, et. al., J. Plasma Fusion Res. Vol.86, No.11 (2010)631.

搬送波-包絡線位相を制御したサイクルレーザーパルスによる アト秒パルス光の発生過程

宮地悟代^{1,2}, 木村 誠², 野口恭史², 宮崎健創², 松田一成²

¹東京農工大学大学院工学研究院

²京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

図 1 に示すように、レーザーパルスの搬送波と包絡線の位相差を、搬送波-包絡線位相 ϕ_{CEP} (carrier-envelope phase, CEP) として定義することができる。パルス幅が搬送波の振動周期の数倍程度、すなわち、数サイクルの電場しか含まないレーザーパルスは特にサイクルレーザーパルスとよばれ、その電場振幅は CEP によって大きく変化する。原子・分子・固体表面における超高速現象の研究において、高強度レーザーパルスによる原子・分子気体からの高次高調波発生 (high-order harmonic generation, HHG) は、アト秒時間領域でのコヒーレントな放射、すなわちアト秒レーザーパルスが発生するため、この時間領域にアクセスする手段として注目されている。HHG はレーザー電場の振幅と位相に敏感に応答する非線形現象であるため、レーザーのパルス幅が搬送波の振動周期の数倍程度にまで短くなると、HHG 特性に CEP の影響が強く現れることが知られている。しかし、CEP によって HHG のスペクトルが変化する理由についてはよく分かっていない。

本研究では、物理過程の詳細を理解するため、CEP を制御可能な高強度 5 fs レーザーパルスを用いることにより、CEP に依存した特徴的な高次高調波スペクトルを観測した。得られた実験結果と簡単なモデル計算の結果を比較することにより、高次高調波スペクトルのピーク位置が CEP で大きく変化するの、搬送波の半周期ごとに発生するアト秒パルスの数が少なく、それらの位相差が CEP で大きく変化することに起因することを明らかにした。

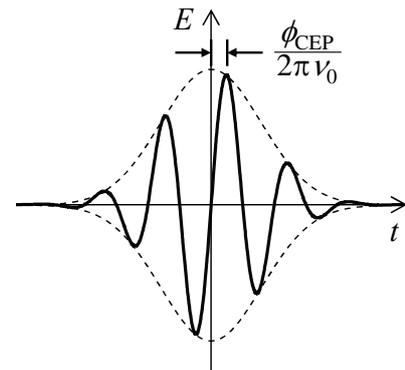


図 1 サイクルレーザーパルスの概略図。実線は電場、破線は包絡線であり、 ν_0 は搬送波周波数である。

2. 実験方法

Ti:sapphire レーザー増幅システムからの出力光(パルス幅 25 fs、中心波長~ 790 nm、繰り返し 1 kHz、パルスエネルギー 1.6 mJ) を使用した。 $f-2f$ 干渉計を用いて CEP の変化を測定し、その変化が一定となるようシステム内に設置したガラスの挿入量を調整することにより、CEP を安定化させると同時に、相対的な CEP ϕ_1 を $-2\pi \sim 2\pi$ の範囲で制御した。ここで $\phi_{\text{CEP}} = \phi_0 + \phi_1$ であり、 ϕ_0 はシステムに依存する絶対的な CEP である。CEP の位相エラーは~200 mrad (root-mean-square 値) であった。システムからの出力光を、2 atm の Ne を充填した中空ガラスファイバー (内径 150 μm 、長さ~ 1 m) に入射し、自己位相変調によってレーザーパルスを広域化した後、チャープミラーで分散補償することにより、パルス幅~5 fs、中心波長~ 800 nm のサイクルレーザーパルス (パルスエネルギー 0.7 mJ) を発生させた。

次に、レーザーパルスを焦点距離 $f = 500$ mm の凹面銀ミラーを用いて Ne ガスジェット (繰り返し 100 Hz、背圧 1 ~ 5 atm) 中に集光し、高次高調波を発生させた。基本波を遮断するため、厚さ 0.10 μm の Al (透過領域 15 ~ 80 eV) もしくは厚さ 0.15 μm の Zr 薄膜フィルタ (透過領域 > 60 eV) を通過させた後、平面結像型斜入射分光器で分光し、CCD で検出した。さらに、Signal-to-noise 比を良くするため、スペクトルを 1000 回程度まで積算して PC に記録した。ここで、サイクルレーザーパルスが最小のパルス幅となるよう最適化するため、凹面ミラーの前に 2 枚のウェッジ板を設置し、高次高調波スペクトルが高エネルギー側へシフトするよう挿入量を調整した。

3. 結果と考察

CEP を安定化したサイクルレーザーパルス (4.7 fs , $1.9 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$) を、背圧 2 atm の Ne ガス中に集光し、発生した高次高調波のスペクトルを観測した。図 2 は、 $\phi_1 = -\pi/2 \sim \pi/2$ で変化させて取得した結果である。図 2(a)に見られるように、Al フィルタを用いると $\sim 70 \text{ eV}$ 以下のスペクトルのピーク位置は ϕ_1 に依らず一定であることがわかる。一方、図 2 (b)に示すように、Zr フィルタを用いると、 $\sim 90 \text{ eV}$ 以上のスペクトルのピーク位置は ϕ_1 を増加させると単調に高エネルギー側へと変化し、 π 毎に同じスペクトルとなることがわかる。

このスペクトルの変化を詳細に理解するために、図 3 に (a) $\phi_1 = \pi/4$ 、(b) $\phi_1 = 3\pi/4$ でのスペクトル強度分布を示す。比較のために図 3(c)に CEP を安定化しない場合の結果を示す。細線は Al フィルタ、太線は Zr フィルタを使用して観測したスペクトルである。この図より、 ϕ_1 によって異なる変化をする 3 つの領域が存在することが見える。まず、 $45 \sim 75 \text{ eV}$ の領域(1)では、 ϕ_1 によってスペクトルのピーク位置が変化しない。次に、 $75 \sim 105 \text{ eV}$ の領域(2)では、 ϕ_1 によってスペクトルのピーク位置は変化するが形状も複雑に変化する。最後に、 $105 \sim 140 \text{ eV}$ の領域(3)では、 ϕ_1 によってスペクトルのピーク位置は単調に変化し、 ϕ_1 が $\pi/2$ 異なると、図 3(a)、(b)に示すようにお互いのピークがそれぞれのピークの間位置する。さらに、 ϕ_1 が π 異なるとこれらは同じスペクトルとなる。この観測結果は、CEP が π 異なる 2 つのサイクルレーザーパルスは電場の向きは異なるが、振幅の大きさは等しいことから説明できる。また、図 3(c)に示すように、位相を安定化しない場合には、全ての ϕ_1 による高次高調波スペクトルが全て平均化されるため、領域(3)では連続スペクトルとなるように見える。以上の結果は、(1)エネルギーの高い高調波が振幅の大きいレーザー電場の半周期ごとに発生する 2 つのアト秒パルスで構成されること、(2)それらの位相差が CEP によって大きく変化することを仮定して計算した結果とよく一致した。

4. おわりに

HHG の物理過程の詳細を理解するため、CEP を制御可能な高強度 5 fs レーザーパルスを用いて、CEP に依存した特徴的な高次高調波スペクトルを観測した。得られた実験結果と簡単なモデル計算の結果とを比較することにより、高次高調波のスペクトルが CEP で大きく変化するのは、搬送波の半周期ごとに発生するアト秒パルスの数が少なく、それらの位相差が CEP で大きく変化することに起因すると考えられる。

[口頭発表リスト]

G.Miyaji, M.Kimura, T.Noguchi, K.Miyazaki, and K.Matsuda, "Attosecond Pulse Generation with Carrier-Envelope Phase Stabilized Few-Cycle Laser Pulses", The 5th International Symposium of Advanced Energy Science, Kyoto University, 2014 年 9 月 29 日, 京都, ポスター.

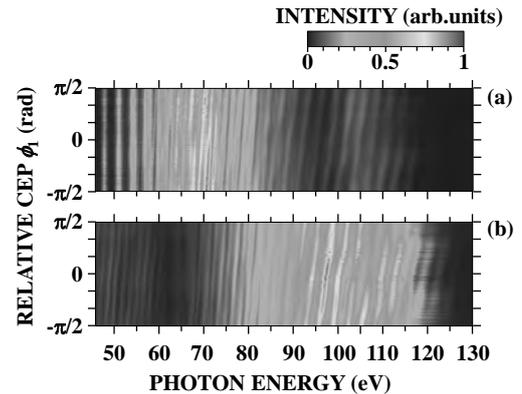


図 2 サイクルレーザーパルスにより発生した高次高調波のスペクトルの CEP 依存性。(a) Al フィルタ、(b) Zr フィルタを使用した。

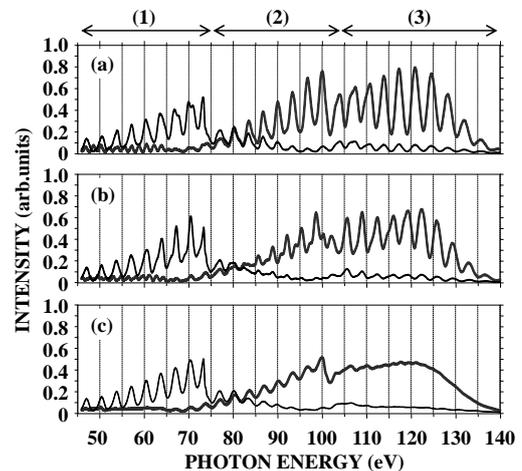


図 3 サイクルレーザーパルスにより発生した高次高調波のスペクトル。(a) $\phi_1 = \pi/4$ 、(b) $\phi_1 = 3\pi/4$ 、(c) CEP を安定化しない場合。細線は Al フィルタ、太線は Zr フィルタを使用して観測したスペクトルを示す。

赤外自由電子レーザーを用いた光触媒物質成膜 および生物 CO₂ 固定の研究

(Study on photocatalytic filmsynthesis and biological CO₂ fixing)

寒河江登志朗¹, 楠瀬(桑田)隆生¹, 早川恭史², 中尾圭佐², 宍倉文夫²,
胡桃聡³, 高橋秀幸³, 鈴木薫³, 大垣英明⁴, 紀井俊輝⁴, 全炳俊⁴

¹ 日本大学松戸歯学部

² 日本大学量子科学研究所

³ 日本大学理工学部

⁴ 京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

本研究グループは、京都大学エネルギー理工学研究所の KU-FEL(波長域 6~20 μ m)と日本大学量子科学研究所電子線利用研究施設の LEBRA-FEL(波長域 2~6 μ m)を利用して広範囲な波長域における共同研究を指向した。当年度の実験研究成果を以下の3つの研究小グループに分けて報告する。

2. 赤外線自由電子レーザーを用いた光触媒・ナノ磁性体・バイオマテリアル加工

本研究では、レーザー照射による水分解光触媒材料の生成や、キトサンのような環境適合性の高い材料において転写・マーキングといったレーザープロセッシングについて探求している。その光源として波長の制御が可能である FEL を導入すれば、各種プロセスに適したレーザー波長が選定されるため、学術的に高いデータ採取に期待される。その中で平成 26 年度では液中レーザーアブレーション (Laser Ablation: LA) に着目した。生成する物質については材料加工性を考慮して Fe とし、本手法により磁性体ナノ粒子化させた。さらに溶液をエタノールとすることで、液中 LA での反応過程において Fe 磁性体ナノ粒子に炭素保護被膜を成長させた。当年度では、後に FEL 照射と比較検討するために YAG レーザ (1064 nm) を光源として初期データ採取を行った。実験装置概略図を図 1 に示す。液中 LA のターゲットとして Fe 板をセル容器内に固定し、溶媒としてエタノールを投入した。YAG レーザ (東芝、LAY-616C) を集光させ Fe ターゲット表面照射し液中 LA を発生させた。レーザーの照射時間は 10 min である。生成物の評価手法は電界放出型透過電子顕微鏡 (日立、200 kV FE-TEM、HF-2000S) を用いた高倍率観察を行った。図 2 に生成物の TEM 像を示す。(a) は合成された一部の粒子の拡大像である。粒子は直径 25 nm 程度の核とそれを覆う 2 nm ほどの皮膜部の存在が確認できる。また(a)の皮膜部を拡大した図(b)が示すように、皮膜は粒子界面に対して平行に格子縞を形成し、層間距離はグラファイト(002)面の格子間隔と概ね等しい 0.34 nm であった。(胡桃ほか)

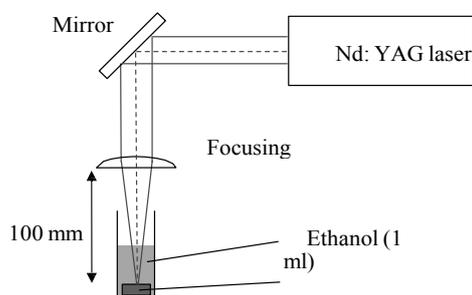


図 1 液中 LA 実験装置概略図

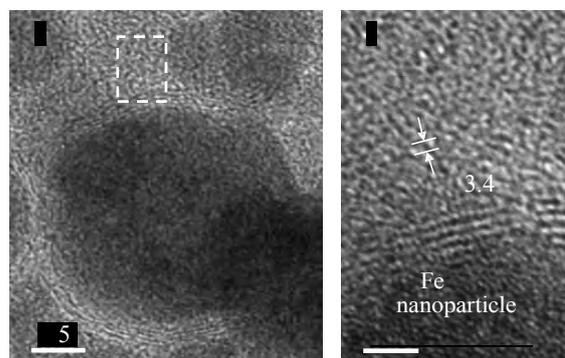


図 2 炭素保護被膜された Fe ナノ粒子の TEM 像

3. 光感受性植物への照射実験による KU-FEL の生物学的効果

平成 25 年度の成果報告書では、KU-FEL の中赤外線領域 ($7\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$) の予備的 (Preliminary) 成果を報告した。平成 26 年度は LEBRA-FEL の波長領域 ($400\text{nm}\sim 6\mu\text{m}$) の照射結果を踏まえて KU-FEL の成果を検証し、可視～中赤外線に亘る FEL の生物学的効果 (レタス種子発芽テストを指標) を総括した。その結果、図-3 に示した通りの成果をあげた: KU-FEL の発振領域 (中赤外線) の照射実験では、発芽促進条件下と発芽阻害条件下のレタス種子に対して、いずれの波長 (7、9、11、13、15、17、19、 $20\mu\text{m}$) を照射しても、可視領域と比較して、阻害または促進効果は認められなかった (20%以下の促進・阻害効果)。

なお、実験条件および操作方法などは平成 25 年度成果報告書 (60-61 頁) に明記している。
(宍倉ほか)

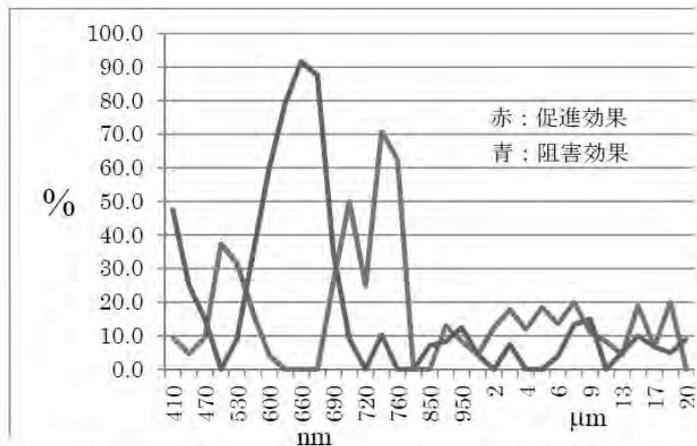
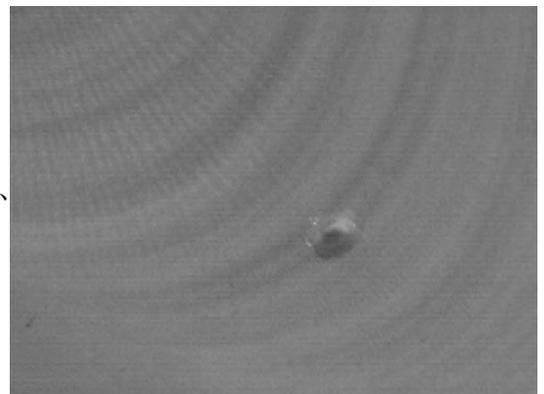


図 3 レタス種子発芽テストによる KU-FEL ($7\sim 20\mu\text{m}$) と LEBRA-FEL ($0.4\sim 6\mu\text{m}$) の生物学的効果 (発芽率: %)

4. KU-FEL と LEBRA-FEL を利用した赤外吸光反応の生物組織の反応

前年度までに、生物による結晶形成 (生体鉱物形成作用 Biomineralization) における炭酸固定の一例としての貝殻 (炭酸カルシウム) と FEL との相互作用について実験研究してきた。その研究の一環として、Biomineralization のもう一方の大きな柱となっているリン酸カルシウム組成の硬組織 (鱗、骨、歯など) についても FEL との相互作用を実験研究してきた。従前の研究で、これらの硬組織が FEL 照射により異なった態度を示すことを明らかにしてきたが、本実験ではさらに波長範囲を拡大して追求した。今回、探索波長域を広げて FEL 照射実験を重ねたところ、従来は無反応であった貝殻に照射による pit 形成を確認できた (下図)。従来はこの波長域では pit 形成は生じないと考えられていたことから、今回の結果はこの反応の理由が判明できていないため、理論的考察を進めている現状である。(寒河江ほか)



5. 本年度発表リストについて

[口頭発表リスト]

F. Shishikura, K. Hayakawa, Y. Hayakawa, M. Inagaki, K. Nakao, K. Nogami, T. Tanaka, T. Kii, H. Ohgaki, H. Zen, and T. Sakae, Potential photochemical applications of the free electron laser irradiation technique in living organisms. FEL 2014, 36th International Free Electron Laser Conference, 25-29 August 2014, Basel, Switzerland (Poster)

石原 他, “ミリ秒パルス Nd: YAG レーザを用いた液中レーザーアブレーション法による炭素被膜 Fe ナノ粒子の創製”, レーザー学会学術講演会第 35 回年次大会講演予稿集, 2015 年 1 月 12 日, 東海大学, 12pVII13

ヘリオトロンJに於ける作動型ダブルプローブによる 周辺計測と高周波加熱の研究

上原和也^{1,2}, 定本嘉郎³, 雨宮 宏⁴, 大島慎介⁵

¹宇宙航空研究開発機構, ²日本原子力研究開発機構, ³上越教育大学,
⁴理研技術相談機関, ⁵京都大学エネルギー理工学研究所

1. はじめに

京都大学のヘリオトロンJは定常運転を目指すヘリカル装置で核融合科学研究所のLHDと共に世界でも有数の実験装置である。最近、ヘリカル装置として低磁場ながら、ガス供給制御によるプラズマ領域の拡大によりNBI/ECH加熱を併用して平均密度 $8 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ で、蓄積エネルギー 5.4 kJ が得られている。このようなプラズマでの周辺プラズマの挙動は重要なプラズマパラメーターである。前年度までにヘリオトロンJにイオン温度測定用プローブである非対称型ダブルプローブ(Asymmetric Double Probe for Heliotron J, ADP-HJ)を取り付け、予備的な測定を行ってきた。ADP-HJでは電極列は磁力線方向に置かれる必要があるが、設置ポートの関係で電極列は磁力線と10~20度の角度をなしていた。そのため、正確なイオン温度の評価はできなかった¹⁾。昨年度は、新しいタイプの作動型ダブルプローブ(Differential Double Probe for Heliotron J, DDP-HJ)を磁力線がなるべく平行位置を確保できそうな、#14.5の垂直ポートへの挿入の設計的検討を行った。今年度は、多様な磁力線に適応出来るような新しいプローブの設計を行った。

2. ヘリオトロンJにおける周辺イオン温度測定用作動ダブルプローブの設計

DDP-HJはADP-HJと同じように長短2種類の電極をもつ単純なダブルプローブで、プローブ列が磁場に平行の状態ではイオン温度が測定できる。通常ダブルプローブでは、電極の長さは同じであるが、これが違るとイオン飽和電流が非対称になり、この比の値からイオン温度 T_i が精密に測定できる。イオンラーモア半径 r_{Li} がプローブの径 a に比べて大きい場合には、長さ方向に入ってくるイオンが多くなり、イオン飽和電流に差が出てくる。これが、 T_i が測定できる条件である。ヘリオトロンJでは、磁場 B が、 $B=1.4-1.6 \text{ T}$ の場合 $T_i=40 \text{ eV}-160 \text{ eV}$ がカバーできることがわかる。図1(Fig. 1)にDDP-HJの模式図を示す。

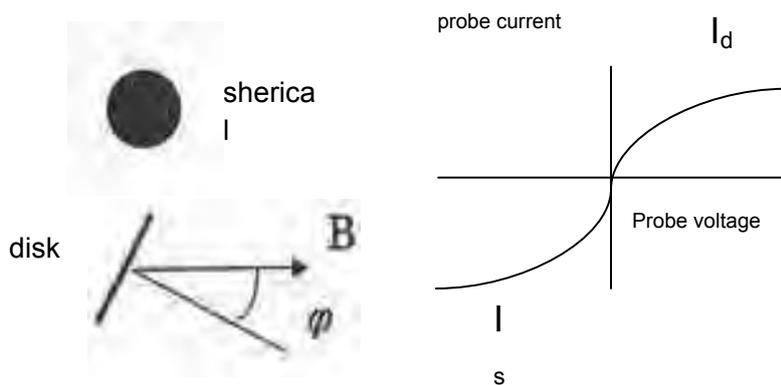


Fig. 1 The ion temperature T_i can be estimated from value of $R = I_d/I_s$ (see Fig. 2)

す。

DDP-HJで短いほうのプロープのイオン飽和電流を I_d 、長いほうのプロープのイオン飽和電流を I_s と書くと、疆磁場では $I_d/I_s=1$ となるが、弱磁場では $I_d/I_s=4$ となる。この間の磁場で I_d/I_s の測定値を角度 α を通してイオン温度 T_i が求まる (図2, Fig.2)。

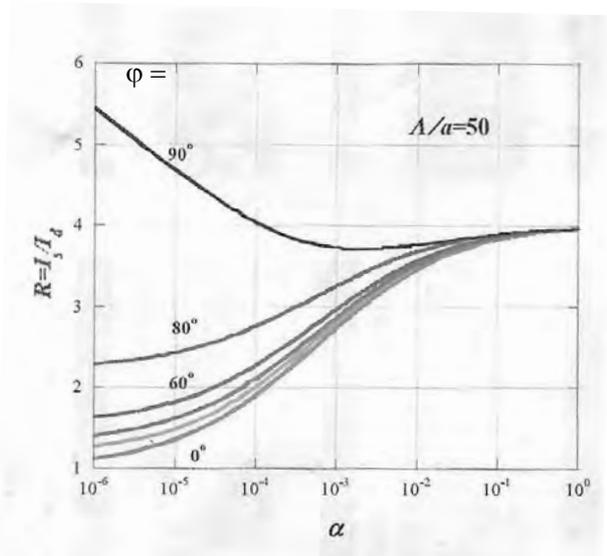


Fig. 2 The value of R against α , where $a = 1 / (1 + \omega^2 \tau^2)$, $\tau =$ mean collision time of ions ($\tau = \Lambda / v_i$), $\omega =$ cyclotron frequency, v_i ($= 8\kappa T_i / \pi M$) ion thermal velocity, Λ is mean free path of ion

図3(Fig. 3)にDDP-HJを取り付け予定の#14.5ポート付近の磁力線を示す。プロープ先端が磁力線とどのような角度になっているかを調べて、イオン温度を推定する。

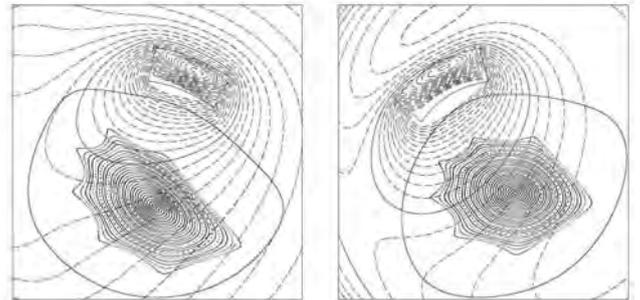


Fig.3 Magnetic field line of Heriotron J

References

- 1) 上原和也、定本嘉郎、川島寿人、大島慎介、ヘリオトロン J に於ける周辺計測と高周波加熱の研究 III, 京都大学エネルギー理工学研究所附属エネルギー複合機構研究センター共同研究成果報告書(平成 25 年度) p. 169
- 2) H. Amemiya and K. Uehara, Jpn. J. Appl. Phys. 45, 247, 2006
- 3) H. Amemiya, K. Uehara, S. Ohshima and T. Mizuuchi, A Method for Measuring the Diffusion Coefficient and Ion temperature in Edge Plasma, submitted to J. Appl. Phys.
K. Uehara, H. Amemiya, S. Ohshima and T. Mizuuchi, Proc. International Symp. Advanced Energy Science, p.195

第二部 活動実績

京都大学エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点
平成 26 年度 共同利用・共同研究
【活動実績】

2014 年 4 月

4 月 10 日 第 1 回 共同利用・共同研究推進室会議

場所： 京都大学エネルギー理工学研究所本館会議室 (N-571E)

- 議題： 1. 平成 25 年度共同利用・共同研究推進室活動の総括
2. 平成 26 年度共同利用・共同研究活動計画
3. 平成 26 年度共同利用・共同研究推進室活動計画
4. ZE ネットワーク活性化へ向けた取り組み
5. 平成 27 年度概算要求の継続分の作成について
6. その他

2014 年 5 月

5 月 19 日 第 1 回 エネ研国際シンポジウム 所内会議

場所： 京都大学エネルギー理工学研究所本館会議室 (N-571E)

5 月 27 日 第 1 回 共同利用・共同研究計画委員会 (メール会議)

応募期限外臨時応募の申請に関する審査と配分額の原案作成

2014 年 6 月

6 月 9 日 第 1 回 共同利用運営委員会 (メール会議)

応募期限外臨時応募の申請に関する審査と配分額の決定

2014 年 7 月

7 月 28 日 第 2 回 共同利用運営委員会

場所： 京都大学エネルギー理工学研究所 本館会議室 (N-571E)

- 議題： 1. 運営委員会委員長等選出について
2. 共同利用・共同研究計画委員会について
3. 平成 26 年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動について
4. 共同利用・共同研究中間評価について
5. その他
ゼロエミッションエネルギーネットワークの活性化について
平成 26 年度概算要求について

2014年10月

9月30日 - 10月2日 第5回エネルギー理工学研究所 国際シンポジウム

The 5th International Symposium of Advanced Energy Science

～ Contribution to Zero-Emission Energy ～

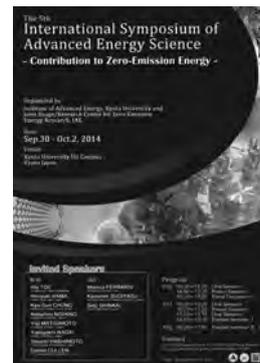
場所： 京都大学エネルギー理工学研究所

内容： 9/30：全体会議

10/1：全体会議

パラレルセミナーI

10/2：パラレルセミナーII



参加者数： 総人数：259名（所内：130名／所外：129名）

2014年11月

11月21日 第2回 共同利用・共同研究計画委員会（メール会議）

平成27年度共同利用・共同研究公募要領案作成

期間外臨時申請に対する採択審議及び配分額案作成

2014年12月

12月4日 第3回 共同利用運営委員会（メール会議）

平成27年度共同利用・共同研究公募要領案

期間外臨時申請に対する採択審議及び配分額案審議・決定

平成27年度共同利用・共同研究公募開始通知

12月12日 通知文書メール配信

12月18日 エネルギー理工学研究所 HP・ZE 拠点 HP 掲載

12月26日 通知文書郵送

12月25日 ゼロエミッションエネルギー研究拠点 技術講習会（共催）

場所： 京都大学宇治キャンパス 本館 N-472E

講師： 株式会社ニコンインステック

内容： 全反射照明蛍光(TIRF)顕微鏡の取り扱い講習
および超解像測定技術に関する紹介

2015年1月

1月8日 共同利用・共同研究推進室アンケート調査

1月20日-1月21日 インフォーマルミーティング

「核融合研究開発のブレイクスルーはどこにあるか？」
～ゼロエミッションとサイクルの視点で熟考する～

1月30日 平成27年度共同利用・共同研究公募及び、平成26年度成果報告書提出
締め切り

2015年2月

2月24日 第3回 共同利用・共同研究計画委員会

場所： 京都大学エネルギー理工学研究所 本館会議室 (N-571E)

- 議題：
1. 平成27年度共同利用・共同研究申請書の採否の原案作成
 2. 平成27年度共同利用・共同研究申請書の研究費・旅費の配
分額の原案作成
 3. 平成26年度共同利用・共同研究の総括
 4. 報告書の作成
 5. その他

2015年3月

3月4日 平成26年度 ゼロエミッションエネルギー研究拠点
共同利用・共同研究成果報告会

場所： 京都大学 宇治キャンパス

内容： 共同研究者10名発表



3月17日 第4回 共同利用運営委員会

場所： 京都大学 宇治キャンパス

エネルギー理工学研究所 本館会議室 (N-571E)

- 議題：
1. 平成27年度公募型共同利用・共同研究課題採択案の審議
 2. 平成27年度運営委員について

3. 平成 26 年度ゼロエミッションエネルギー研究拠点活動の総括
4. 平成 27 年度活動計画
5. 今後の拠点活動に関する意見交換
6. その他

3 月中旬 平成 26 年度成果報告書
郵送・ゼロエミッションエネルギー研究拠点 HP 掲載

3 月末 平成 27 年度採択通知

第三部 その他

平成27年度 京都大学エネルギー理工学研究所
「ゼロエミッションエネルギー研究拠点」
共同利用・共同研究の公募について

目的

本研究拠点は、地球環境問題を抜本的に解決する「ゼロエミッションエネルギー¹」に関するエネルギー研究の推進のために、京都大学エネルギー理工学研究所が有する、先端的・分野横断的な知識・情報ならびに研究施設・設備を、全国の関連する研究者に供することを目的としています。

この主旨に沿って、平成27年度の共同利用・共同研究の公募を下記の要領で行います。

但し、当研究拠点での共同利用・共同研究による核融合研究に関しては、自然科学研究機構 核融合科学研究所が実施する双方向型共同研究に含まれない研究を実施する課題を募集します。

記

1. 公募事項：

ゼロエミッションエネルギーを指向する次の4種類の研究課題を広く公募します。なお研究代表者、利用代表者あるいは集会代表者として申請できるのは、4種類の内のいずれか一種類のみで、かつ1件のみです。

(A) 企画型共同研究

本研究所共同利用運営委員会（以後、「運営委員会」と略称）が、既存分野間の融合的な研究を促進することを目的にして企画した課題テーマに基づいて、本研究所の研究者と共同で行う研究課題。

(B) 提案型共同利用・共同研究

申請者が提案し、本研究所の研究者と共同で行う研究課題。

(C) 共同利用

本研究所の設備・施設を利用する研究計画。

(D) 研究集会

ゼロエミッションエネルギー研究に関する研究集会の開催。

2. 応募資格：

大学及び国・公立研究所等の研究機関の研究者、または、これと同等の研究能力を有すると本研究所所長が認める者。

3. 応募方法：

応募期間内に該当する申請書を電子ファイルで提出してください。

4. 応募期限：

(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会

平成27年1月30日（金）正午 必着

5. 採否：

採否は、運営委員会の議を経て決定されます。

なお、研究期間が年度を超えるような課題についても、次年度以降、公募手続に従って改めて申請書を提出していただきます。

6. 採否決定通知の時期：平成27年3月下旬

¹ 二酸化炭素、有害物質を可能な限り放出しないエネルギーシステム

7. **研究経費**： 予算の範囲内において本研究所で支出します。
8. **旅費**： 予算の範囲内において国立大学法人京都大学旅費規程により支給します。
9. **保険等の加入**：
大学院学生及び学部学生が共同利用・共同研究のため来所する際には、(財)日本国際教育支援協会の学生教育研究災害傷害保険(含、付帯賠償責任保険)またはこれと同等以上の保険に加入している事が条件となります。申請した研究課題が採択された場合、学生(研究生も含む)、所属を持たない名誉教授の方は、「学生教育研究災害傷害保険」又は同等の傷害保険に必ず、ご加入下さい。
10. **施設等の利用**：
研究所内諸施設の利用にあたっては、研究所の諸規則を遵守し、所内担当者の指示に従ってください。
11. **放射性同位元素や放射線発生装置等の使用**：
放射性同位元素や放射線発生装置等を使用する場合は、原則として、事前に所属する機関で放射性同位元素等取扱者及びエックス線装置取扱者の資格を取得する必要があります。その後、研究所へ登録申請していただきます。登録申請の方法ならびに本学における関連する規程は、以下のホームページ(<http://www.uji.kyoto-u.ac.jp/07rix/rix00.html>)に掲載されていますので、ご参照ください。ご不明な点は、所内の教職員へお問い合わせください。
12. **保健及び安全保持に関して**：
保健及び安全保持に関しては、本学の規程に従っていただきます。
詳細は共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。
13. **知的財産権の取扱について**：
京都大学発明規程に定めるところによります。
14. **宿泊施設**：
研究者用の宿泊施設は特に用意していません。近隣のホテルなどをご利用ください。
15. **申請書送付先**：
〒611-0011
京都府宇治市五ヶ庄
京都大学エネルギー理工学研究所
共同利用・共同研究推進室
電子メール：ze_shinsei27@iae.kyoto-u.ac.jp
電話：(0774)38-3413 (ダイヤルイン)
16. **共同利用機器**：
共同利用設備・機器については添付資料を参照してください。
また、Web上(<http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/kosirase/setsubi.html>)に随時更新データを掲載します。
17. **応募期限以降の応募**：
応募期限以降も応募を受け付ける場合があります。共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。但しこの場合、研究費・旅費を配分できない場合もありますので、可能な限り期間内にご応募下さい。
18. **その他**：
その他ご不明な点は、上記共同利用・共同研究推進室までお問い合わせください。

(A) 企画型共同研究公募要項

1. 企画型共同研究：

運営委員会よりテーマ課題を設定し、これに基づいて本研究所の研究者と共同で行う研究です。本年度設定されたテーマは以下の二つです。申請に際しては、所内の教員と十分協議してください。

テーマ1 「太陽光・レーザー・バイオ等を利用したエネルギーシステムに関する研究」

- A) ゼロエミッションエネルギーシステムの一つである太陽エネルギー変換システムに関して、発電、蓄電、省エネルギーに関わる高機能有機／無機／生体材料の開発や、精密分析に関する革新的技術の創成を目指す研究課題。
- B) 超短パルスレーザーや中赤外レーザー、バイオ技術等を利用した環境・エネルギーに関連する精密分析技術の開発や材料創製、エネルギー生成等を目指す研究課題。

テーマ2 「先進原子力システム及びプラズマ利用に関する研究」

- A) 社会基盤となるエネルギー源の開発を目的とした、先進エネルギー材料とプラズマとの相互作用の理解、および、核融合を含めた受動安全性の高い新たな原子力材料の可能性を持つ金属／セラミック材料の創製を目指す研究課題。
- B) 核エネルギーの広範囲にわたる応用を目的とした、プラズマ／マイクロ波技術の応用や熱／粒子エネルギーの利用に関する革新的技術の創成を目指す研究課題。

2. 研究期間： 1年以内

3. 研究代表者： 所外の研究者。ただし、研究組織の中に所内世話人を含む1名以上の所内研究者が参加していなければなりません。なお同一人が研究代表者、利用代表者あるいは集会代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会の内のいずれか一つのみです。

4. 内容等の説明： 研究内容、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同研究が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載して下さい。なお申請における購入経費と旅費の合計額は、100万円を上限とします。

5. 研究報告書： 研究代表者は、平成28年1月29日(金)までに共同研究実施成果報告書を所長へ提出していただきます。また、平成28年3月初旬開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただきます。

6. 謝辞について： 成果発表の際には、謝辞に

“This work is (was) supported by the "Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (課題番号).”

または

This work is (was) supported by the "ZE Research Program, IAE (課題番号).”
の一文を加えてください。

(B) 提案型共同利用・共同研究公募要項

1. 提案型共同利用・共同研究：申請者が提案し、本研究所の研究者共同で行う研究です。
申請に際しては、所内の教員と十分協議してください。
2. 研究期間： 1年以内。
3. 研究代表者： 所外の研究者。ただし、研究組織の中に所内世話人を含む1名以上の所内研究者が参加していなければなりません。なお同一人が研究代表者、利用代表者あるいは集会代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会の内のいずれか一つのみです。
4. 内容等の説明： 研究内容、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同研究が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載して下さい。なお申請における購入経費と旅費の合計額は、50万円を上限とします。
5. 研究報告書： 研究代表者は、平成28年1月29日(金)までに共同研究実施成果報告書を所長へ提出していただきます。また、平成28年3月初旬開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただくことがあります。
6. 謝辞について： 成果発表の際には、謝辞に
“This work is (was) supported by the "Joint Usage/Research Program on Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (課題番号).”
または
“This work is (was) supported by the "ZE Research Program, IAE (課題番号).”
の一文を加えてください。

(C) 共同利用公募要項

1. 共同利用： ゼロエミッションエネルギーを指向する研究を促進するために、本研究所の設備・施設を利用する研究計画。申請に際しては、所内の教職員と十分協議してください。
2. 利用期間： 1年以内。
3. 利用代表者： 所外の研究者。なお同一人が研究代表者、利用代表者あるいは集会代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会の内のいずれか一つのみです。
4. 内容等の説明： 利用内容、利用期間、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。申請書には、当該共同利用が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載して下さい。なお申請における購入経費と旅費の合計額は、50万円を上限とします。
5. 研究報告書： 利用者は、平成28年1月29日(金)までに共同利用実施成果報告書を所長へ提出していただきます。また、平成28年3月初旬開催予定の研究成果報告会において、その研究概要を報告していただくことがあります。
6. 謝辞について： 成果発表の際には、謝辞に
“This work is (was) supported by the "Joint Usage/Research Program on

Zero-Emission Energy Research, Institute of Advanced Energy, Kyoto University (課題番号). ”

または

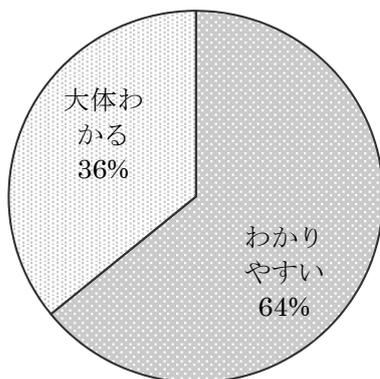
“This work is (was) supported by the "ZE Research Program, IAE (課題番号). ”
の一文を加えてください。

(D) 研究集会公募要項

1. 研究集会： ゼロエミッションエネルギーを指向する研究者間の情報交換と交流を促進し、ゼロエミッションエネルギー研究の為にネットワークの構築に資する研究集会。申請に際しては、所内の教職員と十分協議してください。
2. 開催時期： 平成27年度内に実施。
3. 集会代表者： 所外の研究者。なお同一人が研究代表者、利用代表者あるいは集会代表者として申請できるのは、(A) 企画型共同研究、(B) 提案型共同利用・共同研究、(C) 共同利用、(D) 研究集会の内のいずれか一つのみです。
4. 内容等の説明： 研究集会の内容、期間、所要経費等について、共同利用・共同研究計画委員会で説明していただくことがあります。また研究集会は当拠点と共催の形をとっていただきます。申請書には、当該研究集会が「ゼロエミッションエネルギー」とどのように関連するのかも記載して下さい。なお申請における開催費と旅費の合計額は、50万円を上限とします。
5. 成果報告書： 利用者は、平成28年1月29日(金)までに共同利用実施成果報告書を所長へ提出していただきます。また、平成28年3月初旬開催予定の研究成果報告会において、その成果概要を報告していただくことがあります。

平成 26 年度 京都大学エネルギー理工学研究所
ゼロエミッションエネルギー研究拠点
共同利用・共同研究推進室 アンケート調査結果

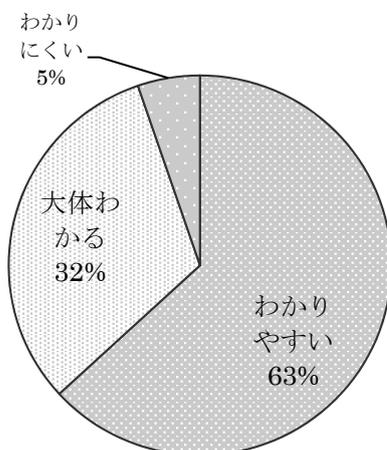
Q1. 共同研究申請書類の説明はわかりやすかったですか？



- ・雛形もあり、わかりやすいと思います。
- ・シンプルなので迷うことなく必要なことを記入することができます。
- ・申請書類がワードファイルではなく、エクセルファイルである点が、作成に際し、使いにくい時があります。
- ・研究組織の所属を記入する箇所が、もう少し大きくてもよいかと思えます。長い所属名だとフォントを小さくしても入りきりません。
- ・H27 年度の募集内容の説明は、共同研究のそれぞれのタイプについて、研究費の上限が明示されており、わかりやすかった。

・年齢選択欄などは他の申請書にみられない項目なので、記入必須なのか説明があるとよかったです。

Q2. 共同研究実施に際しての事務手続きはわかりやすかったですか？



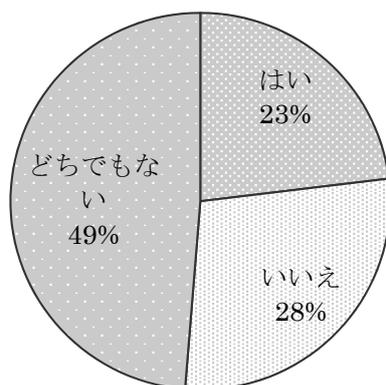
- ・Excel のフォーマットは入力しないといけない項目がわかりやすい。
- ・こまめにご連絡頂き、大変助かりました。
- ・研究費の使用期限をもう少し遅くに設定していただけると助かります。
- ・発注はこちらで、納品は京大というのが他大学のシステムと違って混乱します。こちらで発注の場合にはこちらに納品してもらって検取印を押した伝票をそちらにお送りする、あるいは、逆にそちらで発注していただいてそちらに納品していただく方が感覚的にはわかりやすいです。

・物品の購入方法、納品等が少々複雑ですが、事務手続きの具体的な手順を資料にまとめているので大変分かりやすかったです。

・手続きの流れを理解することはわかりやすかったです、(致し方ないことだとは思いますが)納品を一旦宇治の推進室にて行い、そのうち共同研究先に送付する流れは、時間、効率の面からは改善すべき余地があるように感じました。また、宇治から物品を送付いただくのに、送付代が別途かかってその分、予算を無為に消費してしまうことにも、疑問を感じました。私の場合は、たまたま場所が近いので 2 回目以降は、業者に宇治での納品手続きののちに、その業者に本学まで配達を依頼したので送付代をかけずに済みましたが、制度的には改善していただけたらと思います。

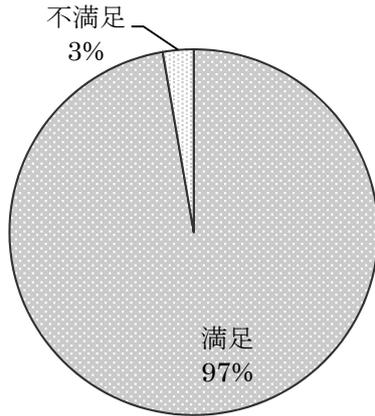
- ・事務手続きを MS Office のファイルで行っているが、このアンケートの用紙(のチェックボタンが選択できないソフトがある)も含めて特定のバージョンに依存したファイルが少なくない。常時、該当バージョンの Office を使っていない、あるいはインストールされていない PC を使用している場合、どうしても締切への対応が困難となる。書類をメールで送るのではなく、いくつかのフォーマットのファイルを研究所のページから選択してダウンロードできるようにしていただきたい。

Q3. 共同研究の研究会開催を希望しますか？



- ・ 口頭+ポスターで全グループが発表する形を希望。
日程は 10:00-17:00 を希望(1 日)
- ・ もう少し分野を絞って頂けたら、学生も一緒に連れて行きたいと思います。
- ・ 企画されればぜひ参加したいが、旅費の支援による。
- ・ 共同利用・共同研究成果報告会へは参加したことがないのでわかりませんが、シンポジウムは貴所で行っている様々な研究に触れることができるので、今後も開催していただければと思います。
- ・ 所内共同研究者の意向次第。
- ・ 物理、化学、材料、などの大きなくくりでよいので、研究内容と研究者の顔・名前が対応するしかけがあるとよいように思う。今後の人的ネットワーク作りという観点から、全研究者に(短時間でもいいので)話をしてもらう分科会形式は有効であるように思われる。
- ・ 中東、東南アジアなどのエネルギー開発と政策をテーマとしたもの。
- ・ 支援側として研究会等の企画が重要であることを認識します。ただ義務化されてしまうと、多忙な中難しいことが生じるかもしれないことを懸念いたします。
- ・ エネ研外の研究者どうしが、エネ研の研究者を介して共同研究できるような機会になれば良いと思う。
- ・ もし共同研究の研究会を開催するならば、テーマを絞って密な議論ができるような会にいただければ有難いです。

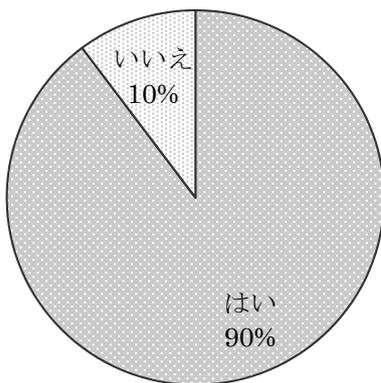
Q4. 共同研究の研究設備・環境へは期待どおりでしたか？



- ・満足しております。
- ・自由電子レーザー施設 KU-FEL を使用させていただいておりますが、ご多忙のところ共同研究を実施していただき感謝しております。より安定な装置にするため、空調等のインフラ設備に貴学が考慮していただければ幸いです。
- ・最新鋭の設備にアクセスできるので有り難いです。
- ・設備利用料の割引があるととても助かります。
- ・ぜひ各種の機器をそろえていただければと存じます。

- ・装置の予約等を拠点事務を中心に対応頂ければ、もう少し使い易い。
- ・KU-FEL を利用しているが、光源の安定と、実験時の光源の性質の把握、について改善が必要と思う。

Q5. エネルギー理工学研究所のHPはご覧になりますか？

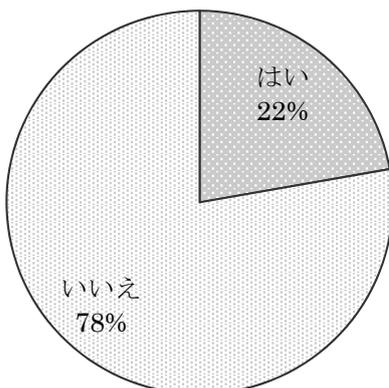


- ・わかりやすいと思います。
- ・拠点の website をもう少し充実させて欲しい。
- ・過去のシンポジウムや共同利用・共同研究成果報告会の情報が消去されているようです。参考になることが多いので、過去の情報も残しておいていただきたく思います。
- ・ゼロエミッションエネルギー研究拠点のHPは華やかさはないが機能的でよい。様式などのダウンロードメニューも見やすい。ただし、成果報告など一部、データが更新されていない所は気になった。

- ・本共同研究の申請時によく見ます。見たい情報源にアクセスしやすいので、特に要望はありません。

Q6. HP をご覧になった方に伺います。

HP 掲載の共同利用・共同研究スケジュールは活用されていますか？



【その他、意見・要望】

- ・平素よりお世話になっております。いつもありがとうございます。毎年 9 月ごろに実施されるシンポジウムに関して、国内外学会と重なることが非常に多いため、日程を考慮していただけますと幸甚です。よろしく願い申し上げます。
- ・今後も、共同利用・共同研究の枠組みを強力に推進していただけたらと思います。
- ・ぜひ今後も活動を広げていただきたい。装置利用料についてゼロエミッション向けの割引料金があるととても助かります。
- ・現状の共同研究で満足感が高いのですが、もう少し研究費の配分を増やしていただけると助かります。遠方からの参画だと、共同実験実施やシンポジウム参加、それに施設使用料でほぼ研究費がなくなってしまう。
- ・時間が限られる中、必要最小の情報を得るのに終始しております。なるべく見やすいHPであると助かります。
- ・支援していただきありがとうございます。分野に跨がる研究テーマが増えている昨今、共同研究が非常に重要になっています。化学研究所の専門を異にする優秀な先生方との共同研究が促進できるこのような取り組みを、今後もぜひ続けていっていただければと思います。

