

Laboratory for Photon and Charged Particle Research  
Institute of Advanced Energy, Kyoto University

量子光・加速粒子

総合工学研究棟

京都大学エネルギー理工学研究所

DuET KUFEL MUSTER



# はじめに

本研究所は、平成8年5月、京都大学原子エネルギー研究所およびヘリオトロン核融合研究センターの統合・再編により、「エネルギーの生成、変換、利用の高度化研究」を設置目的とするエネルギー理工学研究所に改組発足いたしました。すなわち、エネルギーに関する理工学分野において、特に社会的受容性の高い、高品位エネルギー（環境調和型）の特殊・複合問題を研究対象とし、その後、研究所の研究組織体制と研究基盤の整備・充実に努める一方、研究所の特長を活かした研究・教育活動を精力的に行ってまいりました。

この度、皆様の格別のご支援により、旧「ヘリオトロン核融合研究センター（D棟）」の大規模な改装で、本研究所の中核的実験装置となります。複合ビーム材料照射装置(DuET)、マルチスケール材料評価基盤設備(MUSTER)ならびに自由電子レーザー発生装置(KUFEL)を収納することができ、当該研究分野の飛躍的な発展に大きな一歩を踏み出すことができますことは、私ども所員一同の大きな喜びであります。また、その後の京都大学におけるヘリオトロンE装置建設、核融合科学研究所の設立、超大型先端装置LHDの建設に極めて大きな影響を及ぼした、昭和45年に建設されましたヘリオトロンD装置の由緒ある実験棟を、このような形で使わせていただくことは私どもにとりまして大きな喜びと共に誇りでもあります。

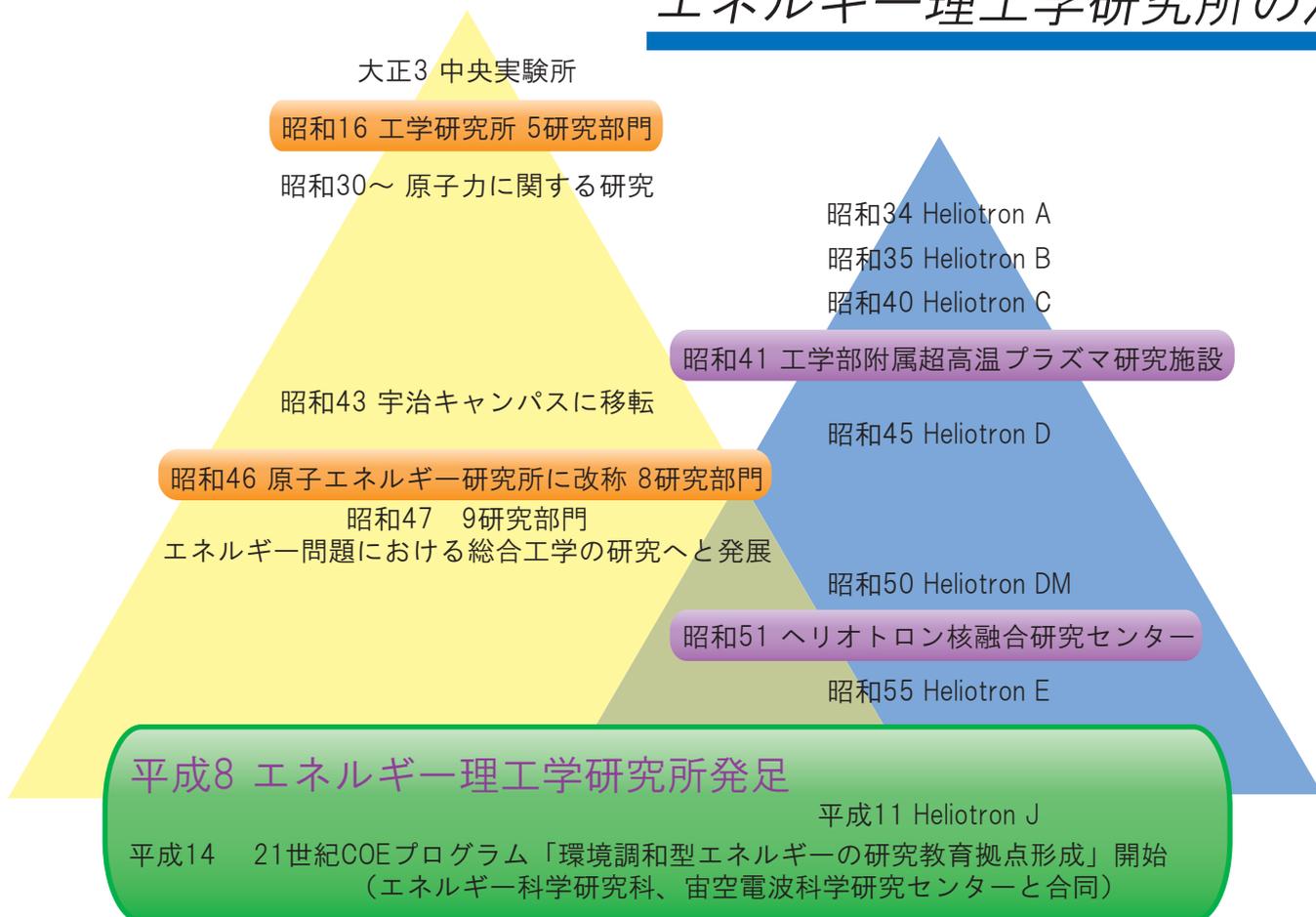
平成17年度に改組10年目を迎える新しい研究所ではありますが、現在ますます緊急的な課題となっておりますエネルギー・環境問題の解決に向けて、所員一同、さらに先端的な装置群を駆使して研究に邁進する覚悟でございますので、今後とも何卒よろしく、ご助言、ご支援をお願いいたします。

平成16年12月  
京都大学エネルギー理工学研究所  
所長 吉川 潔

## 目次

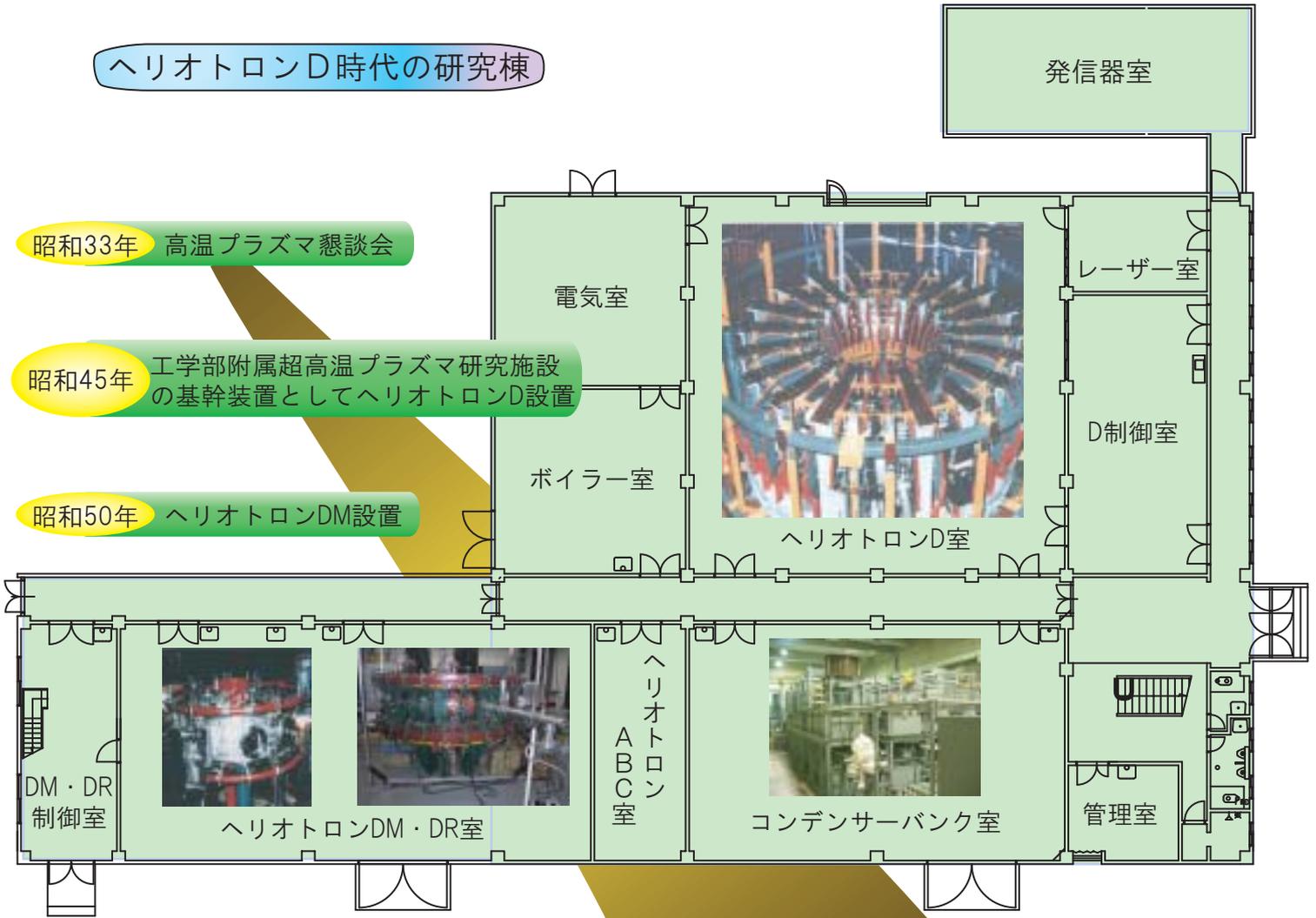
はじめに	1
エネルギー理工学研究所の沿革	1
量子光・加速粒子 総合工学研究棟の沿革	2
量子光・加速粒子 総合工学研究棟の配置	3
DuETの概要	4
MUSTERの概要	7
KUFELの概要	11

## エネルギー理工学研究所の沿革



# 量子光・加速粒子総合工学研究棟の沿革

## ヘリオトロンD時代の研究棟



昭和33年 高温プラズマ懇談会

昭和45年 工学部附属超高温プラズマ研究施設の基幹装置としてヘリオトロンD設置

昭和50年 ヘリオトロンDM設置

平成8年

原子エネルギー研究所とヘリオトロン核融合研究センターの合併・改組によりエネルギー理工学研究所が誕生

平成10年 旧ヘリオトロンD棟(北2号棟)におけるDuET実験区域整備計画を策定



平成12年 DuETの主要設備設置完了

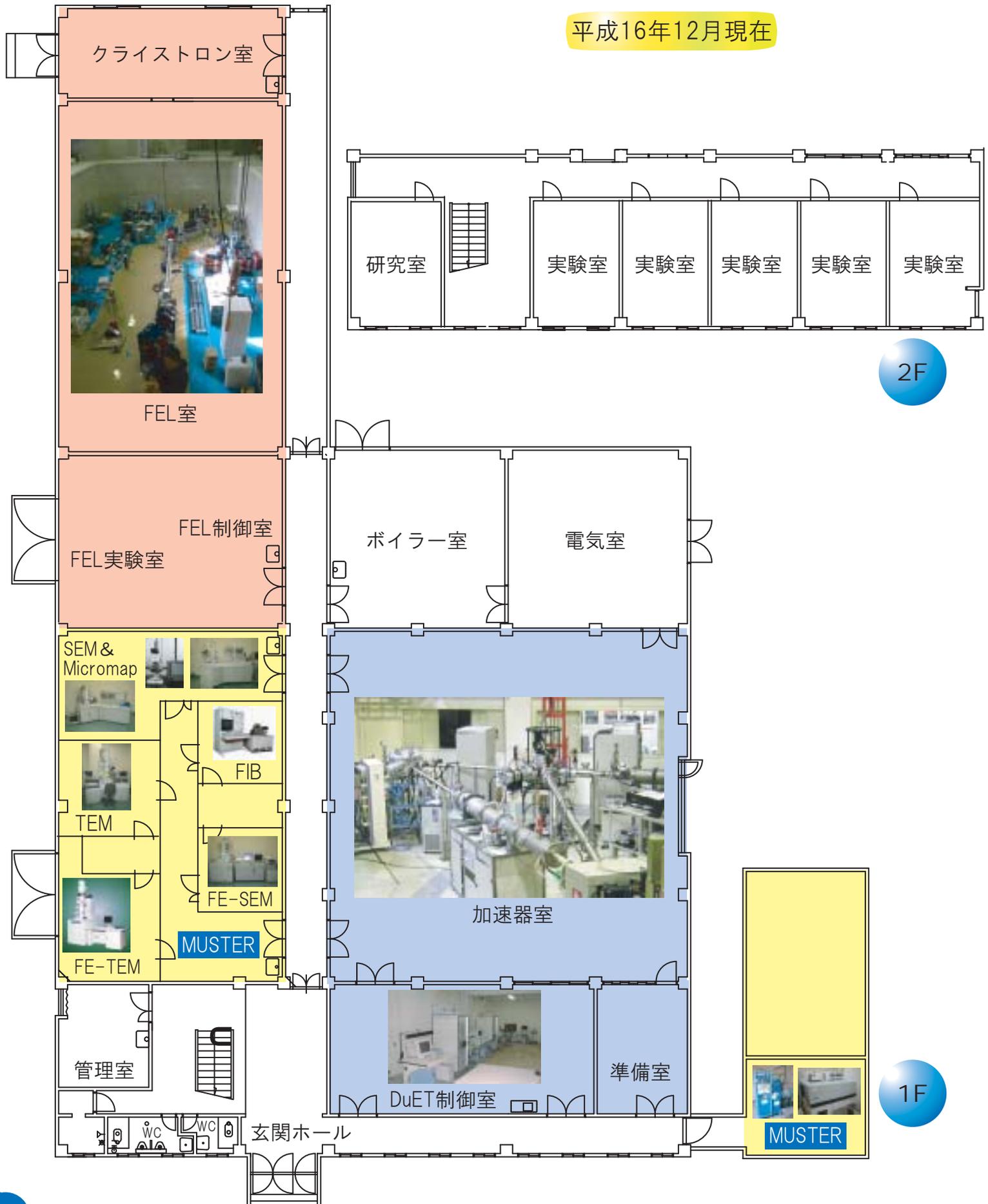
平成16年 MUSTER第一期計画完了(研究棟の整備, 関連装置の移設)



平成16年 KUFEL施設設置完了

# 量子光・加速粒子総合工学研究棟の配置

平成16年12月現在



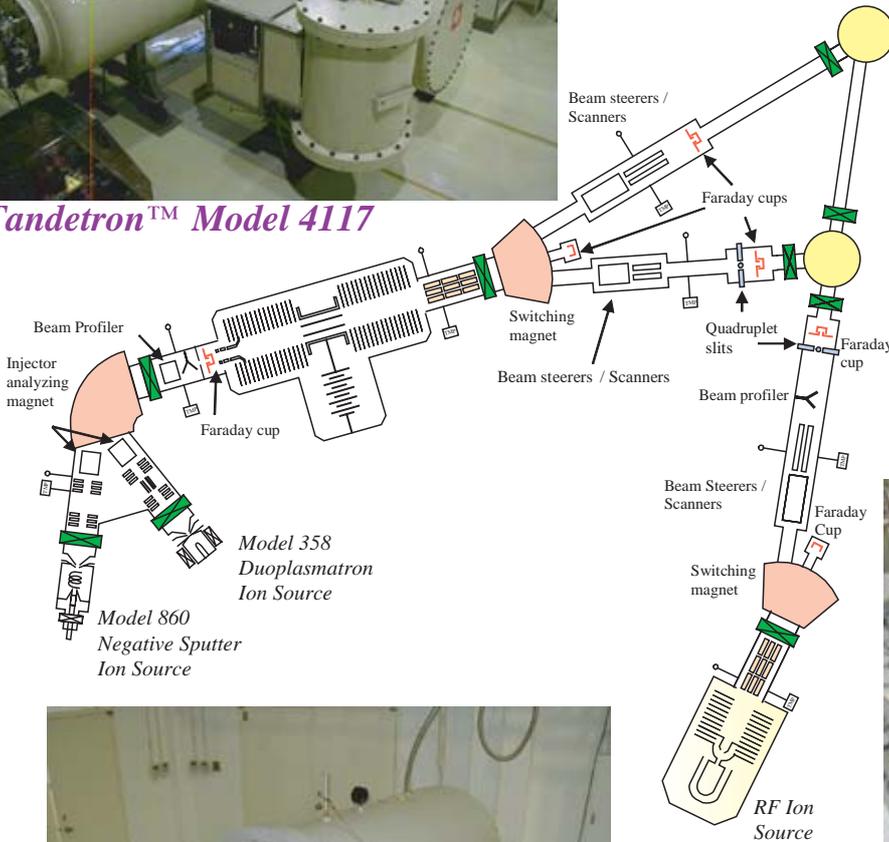


# 加速粒子を用いた先進材料の創製と評価

DuET (Dual-Beam Facility for Energy Science and Technology)は、将来の基盤エネルギーシステム開発に関わる基礎研究を目的として、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基幹実験装置(高度エネルギー機能変換実験装置)の一部として開発された、MeV級加速器を中心とする設備です。



**Tandatron™ Model 4117**



**DuMIS Dual-beam Materials Irradiation Station**  
エネルギー材料の照射効果研究において主要な役割を果たすデュアルイオン照射用の高精度照射ステーションです。



**HiMAS High-temperature Materials Analyzing Station**  
イオンビームを用いた材料分析用ステーションです。



**Singletron™**

DuETの名称は、2台の主加速器からのイオンビームの交差点において複合ビームと固体材料の相互作用に関する実験を行うという、本設備の特徴を表現するものとして命名しました。  
また、核融合炉材料やプラズマ・固体相互作用などの核融合工学研究と、将来の多様なエネルギーシステムへの応用を目指した機能・構造材料開発研究の調和した発展を担うべく願いが込められています。



**Control Room**

# 複合ビーム材料照射ステーション (Dual-beam Materials Irradiation Station; DuMIS)

**エネルギーディグレーダー：**  
デュアル照射実験において適切なヘリウム／損傷比のヘリウムを試料に注入することが可能です。

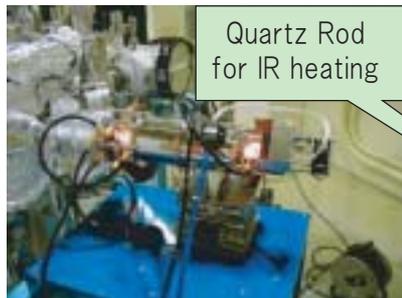


Beam Energy Degradator



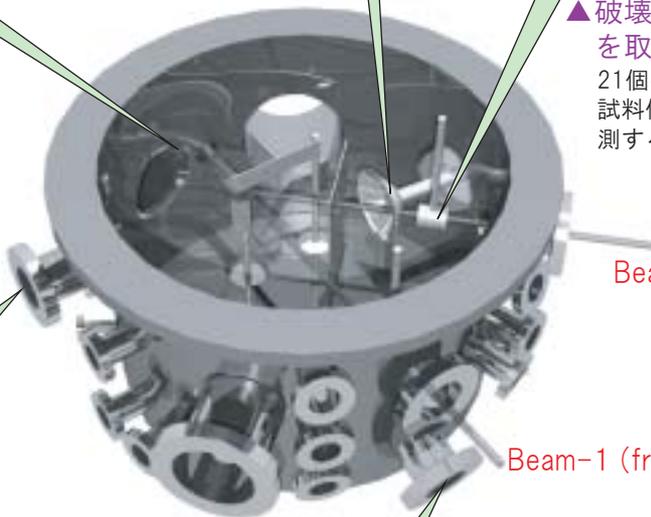
Faraday-cup Array for Beam-2

▲破壊式ファラデーカップアレイを取り付けたビーム計測装置：21個のファラデーカップにより個々の試料位置におけるビーム量を精密に計測することができます。



Quartz Rod for IR heating

▲赤外線導入加熱装置：試料ホルダを背面から加熱し、1400℃までの照射実験を可能にします。



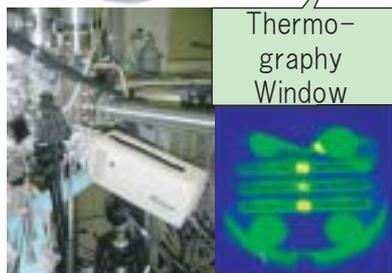
Beam-2 (from Singletron)

Beam-1 (from Tandetron)



Specimen Loading Port

▲試料トランスポートシステム：本体の真空を破ることなく試料ホルダの交換が可能です。



Thermography Window

◀サーマルビジョンと加熱された試料の熱分布プロファイリング：試料温度測定には、熱電対とともにサーマルビジョンが併用され、照射温度の精密な制御が可能です。

# 高温材料分析ステーション (High-temperature Materials Analysis Station; HiMAS)



▲5keVアルゴンイオンガンとRBS検出器：  
RBS（ラザフォード後方散乱分析）により、各種材料の組成や構造の分析が可能です。アルゴンイオンガンは試料表面洗浄・研磨に使用されます。



▲紫外線レーザー発生装置



▲フォトルミネッセンス装置

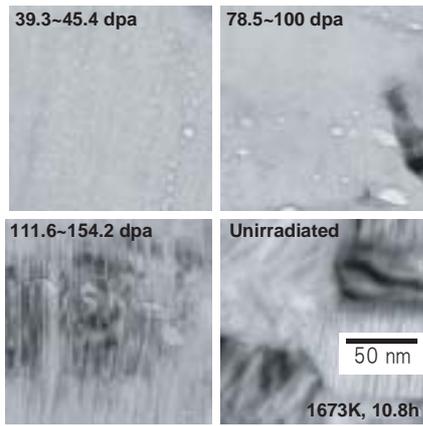
レーザー光により半導体等の試料から励起される蛍光（ルミネッセンス）を分光する装置です。分光器・検出器はサイドポートに取り付けられており、紫外線レーザー発生装置と光ファイバーにより繋がられています。

**クライオスタット**

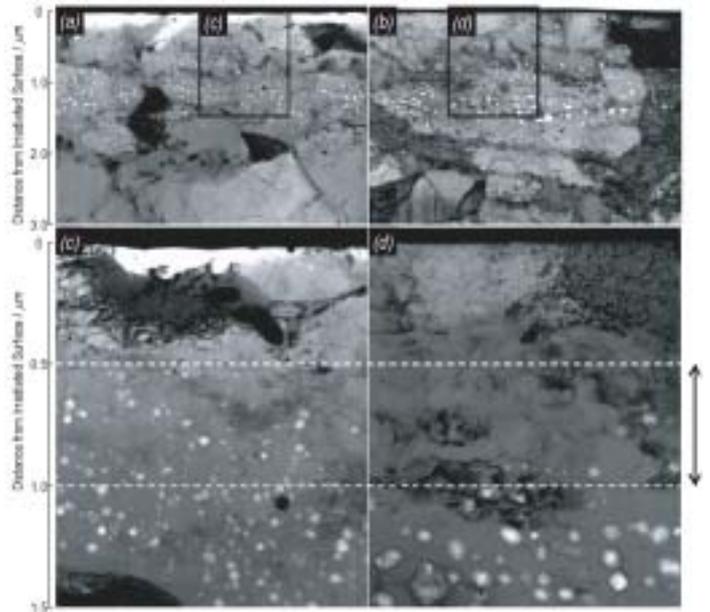
液体ヘリウムコンプレッサーとヒーターを装備した温度可変型で、大型の赤外線導入加熱装置と合わせると液体ヘリウム温度から1800℃まで任意の温度において各種の材料分析実験が可能です。



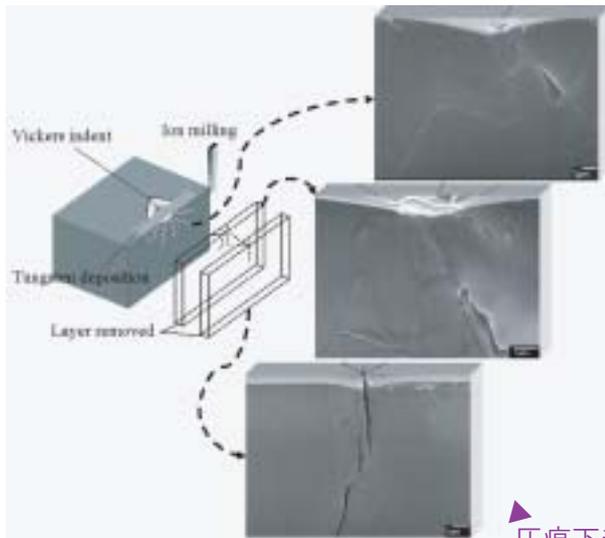
# DuETを利用した研究成果例



◀デュアルイオン照射したSiC/SiC複合材料のマトリックスに形成されたキャビティ：1673Kでの照射実験結果



▲デュアルイオン照射した低放射化フェライト鋼の微細組織変化：照射条件は、照射温度(a)、(c)743K及び(b)(d)793 K。損傷量、ヘリウム注入比はともに60 dpa、15 appm He/dpa（照射表面から850 nm 位置）



▶ 圧痕下部の破壊挙動の3次元解析：SiCの優れた照射下組織安定性と亀裂進展の抑制を明確に示唆し、優れた耐照射性を明らかにした。

## DuET緒元

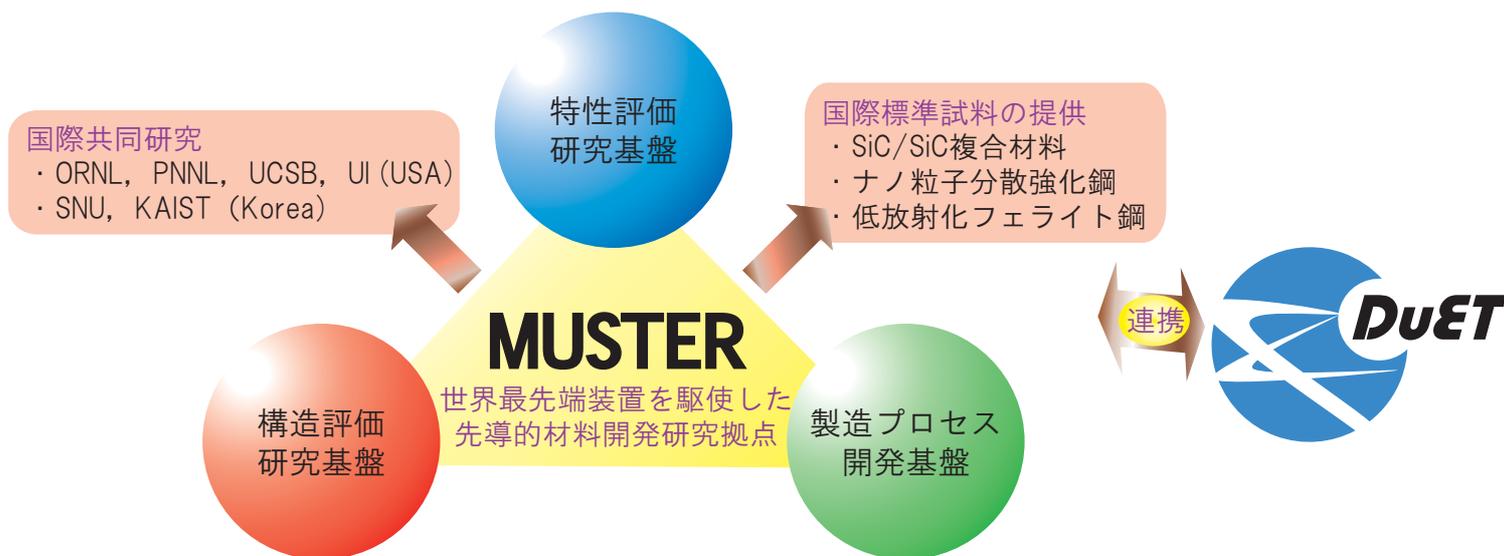
ACCELERATORS	Tandatron	Singletron
Terminal voltage range	0.1-1.7MV	0.1-1.0MV
High voltage source	Cockroft-Walton Type	Cockroft-Walton Type
Representative beam currents	Si <sup>3+</sup> 40mA Au <sup>3+</sup> 20mA	Cu <sup>3+</sup> 30mA He <sup>2+</sup> 2mA
Target connections	DuMIS, HiMAS	DuMIS, HiMAS
TARGET STATIONS	DuMIS	HiMAS
Description	Dual-Beam Materials Irradiation Station	High-temperature Materials Analysing Station
Temperature range	293 - 1673 K	4 - 2073 K
Heat source	Infrared / resistance heater	Infrared / resistance heater
Temperature monitors	Thermography + thermocouples	Thermography + thermocouples
Environment	Vacuum (<10 <sup>-4</sup> Pa)	Vacuum, He, O etc. 2
In/on -chamber sub-systems	2-dimensional micro-Faraday-cup beam profile monitors Beam energy degrader	Ion beam conditioner RBS / ERDA Mass spectrometry Ionoluminescence Photoluminescence



## 革新的素材開発のための多角的・多次的評価研究

MUSTER (Multi-scale testing and evaluation research) 施設は、DuET施設と相補的な関係を有しており、先進材料を対象に、サブナノスケールから実用寸法のレベルまで連続的にマルチスケールで、化学組成、構造組成、強度特性の評価を行うことが可能な研究施設です。また、これらの研究の基盤をなすものとして先進的な材料プロセス検討施設も含まれています。

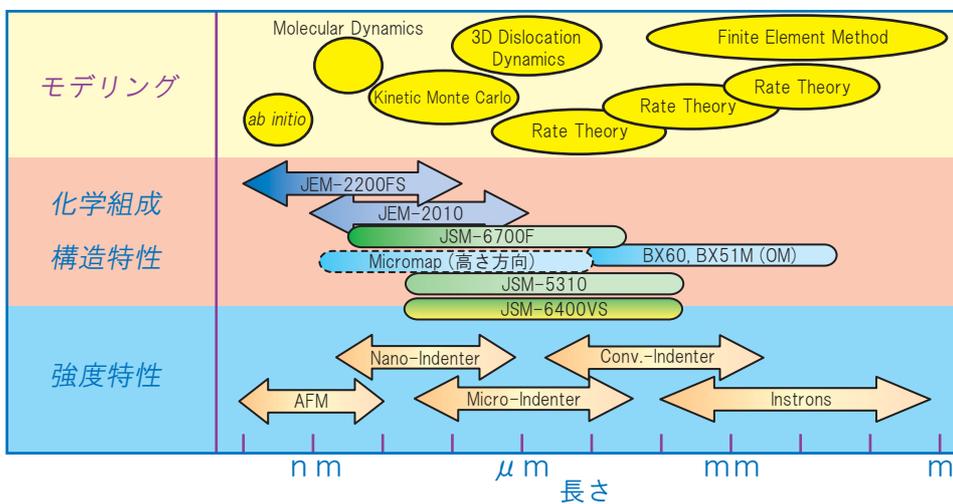
## MUSTER施設の構成



## マルチスケール評価研究

先進的なエネルギー研究においては、超高温や厳しい腐食環境に耐える「耐極限環境材料」の実現が不可欠です。

MUSTER施設は、材料の挙動を支配する超微細組織のサブナノスケールから実機構造体にいる大規模スケールまでの体系化されたマルチスケール評価システムを構築しており、効率的な研究の遂行に寄与しています。

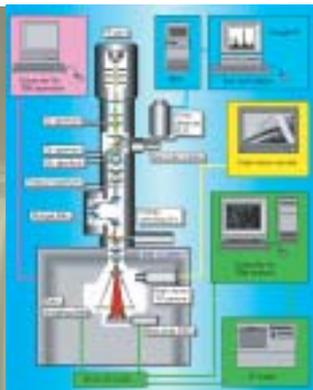


## 将来構想と研究計画

当研究所将来構想では、MUSTER施設を有機的かつ効率的に利用できるように「MUSTERセンター」を設立し、既存の設備の効率的な再配置と新規設備導入により、学内はもとより世界の先端を担う研究者が共同利用しやすい環境を整え、先端材料評価研究の国際的な拠点の形成を目指しています。将来構想にあるMUSTERセンターでは右のテーマに関する研究実施が計画されており、すでに一部の活動は活発に進められています。

- 21世紀COEプログラム「環境調和型エネルギーシステムの研究拠点形成」におけるプラズマエネルギー研究での材料開発
- 文部科学省「革新的原子力技術開発プロジェクト」における高温ガス冷却高速炉炉心構造体用材料研究
- 日米科学技術交流計画「核融合材料の照射効果の研究」における材料基礎研究
- 水素エネルギーシステム用高度機能材料の研究
- 高輝度コヒーレント光用機能材料の研究
- バイオエネルギーシステム用材料開発
- テラヘルツデバイス用材料開発
- ナノ粒子を利用するナノ材料開発の基盤研究

MUSTERでは、多角的・多次元的で且つ高精度評価が可能で世界唯一の先進的な装置群の整備が着実に進んでおり、先進的なエネルギー材料研究において多くの画期的な成果が得られつつあります。特に構造評価研究に関しては当研究所が所有する各種顕微鏡、分析装置の高度化・集中化を進めて、有機的で効率的な研究を可能にしています。



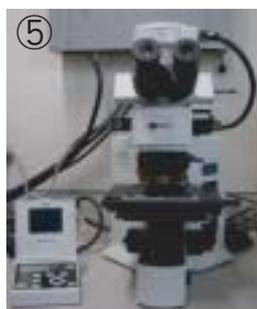
## ◀JEM-2200FS 電界放出型透過電子顕微鏡

200kVのインカラムエネルギーフィルターを搭載した、世界最新鋭の電界放出型透過電子顕微鏡です。フィールドエミッション電子銃（FEG）からの高輝度、高可干渉電子線とオメガフィルター設置による軽元素からのエネルギー分光性能の向上により、高分解能電子顕微鏡観察や試料組成、結合状態などの解析、元素の分布状態解析（マッピング）などを行う事ができます。



## ▲JSM-6700F 電界放出型走査電子顕微鏡

コールドFEGを搭載した走査電子顕微鏡です。ナノスケールでの微細加工、ナノ微粒子・ファイバー等の高分解観察に最適な強励磁コニカルレンズを搭載しています。付属するEDSを用いることにより、試料表面や破面における元素マッピングも可能です。



- ① JSM-5310 走査電子顕微鏡 (EDS 付属)
- ② JSM-6400VS 走査電子顕微鏡 (微小押込試験機内臓)
- ③ Micromap 干渉型表面形状精密測定装置
- ④ JEM-2010 透過電子顕微鏡 (EDS 付属)
- ⑤ BX-51M 光学顕微鏡 (CCD 搭載)



## ▲収束イオンビーム装置 (FIB)

FIBは、細く絞ったイオンビームを用いて試料の局所領域を微細加工する装置です。二次イオン像より任意の位置からのサンプリングが可能です。マイクロピックアップシステム (右上) を使用することにより、DuET照射試料の断面観察用薄膜試料の作製に威力を発揮します。



超微小押込硬さ試験機  
ENT-1100a



微小硬さ試験機 MZT-3



硬さ試験機  
HM-101, HM-103-HH



セラミクス繊維高温  
クリーブ試験装置



引張圧縮疲労試験機



脆性セラミクス複合  
材料熱・応用負荷試験  
システム



デジタル万能試験機  
レトロフィット5581型



デジタル疲労試験機  
8861S型



破壊靱性試験機  
8562型



昇温脱離試験装置



環境強度特性評価装置/SCC感受性評価装置



超臨界腐食試験装置



全自動レーザーフラッシュ  
法熱定数測定装置

### その他

- ・高温衝撃特性評価装置
- ・高速衝撃特性評価装置
- ・水素脆性評価装置
- ・電気抵抗非破壊検査装置
- ・陽電子寿命測定装置
- ・腐食特性評価装置

特性評価研究基盤は、サブナノスケールから実用寸法レベルに至るマルチスケールでの強度特性を連続的に評価できる試験機群と、超臨界水をはじめとする種々の環境下での材料特性を調べるための材料物性評価装置群から構成されています。



アーク溶解装置



超高温ホット  
プレス炉



遊星型ボール  
ミリング装置



電子ビーム装置



オートマチック  
ダイシングソー

### その他

- ・グローブボックス
- ・クエンチ炉
- ・マッフル炉
- ・各種切断機・研磨機



高真空ガス雰囲気・  
分析管状炉



高温真空雰囲気炉



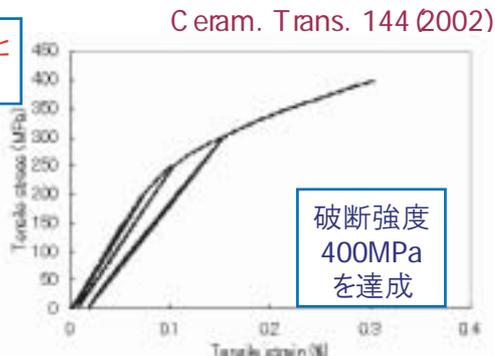
質量分析ゴールド  
イメージ炉

製造プロセス開発基盤は、材料特性評価に基づくプロセス制御を行う、先進材料研究・開発の拠点となるための装置群です。この施設によりこれまでに画期的なSiC/SiC複合材料や低放射化鉄鋼材料・先進ODS鋼などの開発が行われています。

## ● 革新的セラミックス複合材料 (SiC/SiC) 製造プロセスを開発し、事業化へと展開



組織の微細化と緻密化に成功



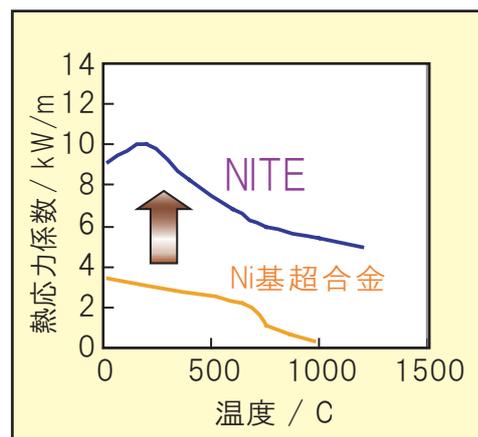
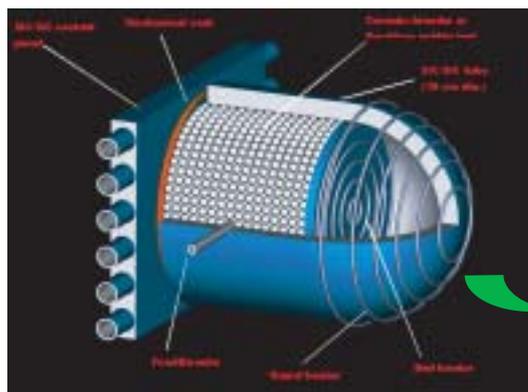
Ceram. Trans. 144 (2002)

宇部興産(株)及び三菱重工業(株)にて事業化

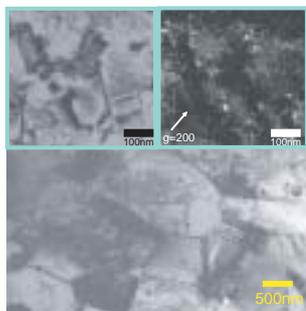
SiC/SiC複合材料は、究極と言われる低放射化特性と1000℃を優に超える高温運転を可能にすること等から、高品位な核融合動力炉の材料として大きな期待を背負っています。同時にSiC/SiC複合材料は次世代ガスタービンや超臨界水システム、航空宇宙分野における推進システムや耐熱構造など次世代技術への幅広い応用が期待されています。本研究所ではSiC/SiC複合材料のプロセス開発と評価を鋭意進めており、既に米国オークリッジ国立研究所、仏ボルドー大学と並ぶ世界的な研究開発拠点として学界・産業界から広く認知されるに至っています。

## ● SiC/SiCの超高温タービン実機部品としての可能性を世界で始めて実証

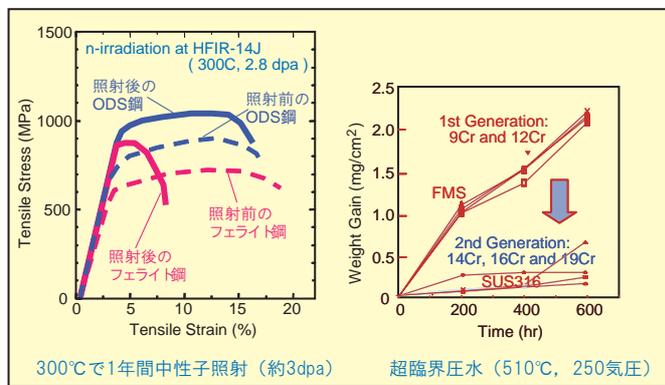
Fusion Eng. Design 61 (2002)



## ● 革新的な耐照射性能、高温強度特性、ステンレス鋼に匹敵する耐食性を持つナノ分散強化鋼の開発に成功 ICAPP'04



JNC・KOBELCOとの共同研究開発



300℃で1年間中性子照射 (約3dpa)

超臨界圧水 (510℃, 250気圧)

## ● 核融合炉用低放射化フェライト鋼を開発し、国際エネルギー機関(IEA)認定の国際サーベイランス材料を提供

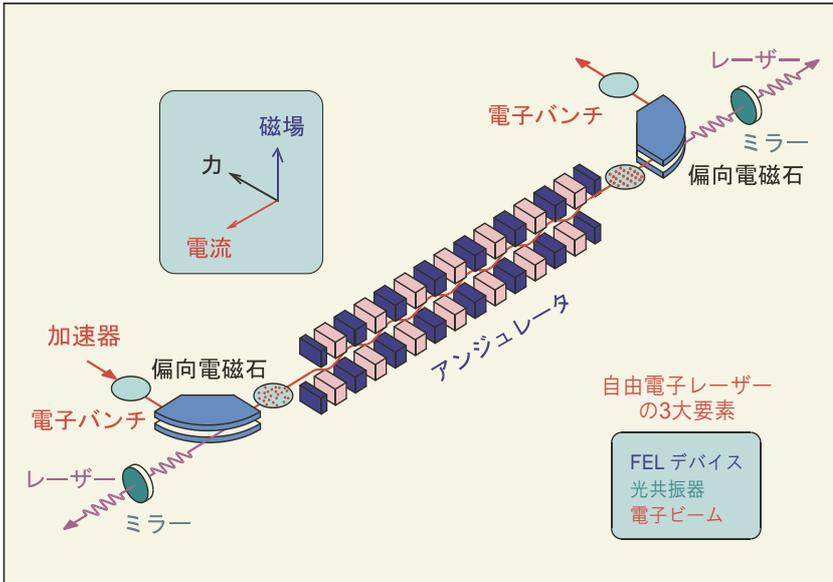
本所で開発された耐食性ODS鋼は、従来材料に比較すると格段に耐照射性能と耐食性能に優れており、核融合炉、超臨界圧水炉および軽水炉高燃焼度化などの先進水冷却原子力プラント用の革新的な構造材料として期待されており、国際共同研究の準備が着々と進められています。



# 京都大学自由電子レーザー施設

KUFEL (Kyoto University Free-Electron Laser、京都大学自由電子レーザー施設) は、将来のエネルギーシステム開発に関わる研究の基盤装置として、京都大学エネルギー理工学研究所において建設されつつある波長可変、コヒーレントで広帯域の赤外光源です。従来の施設に比べて、小型で簡便であるという特徴を有しています。

## 自由電子レーザーの概念図

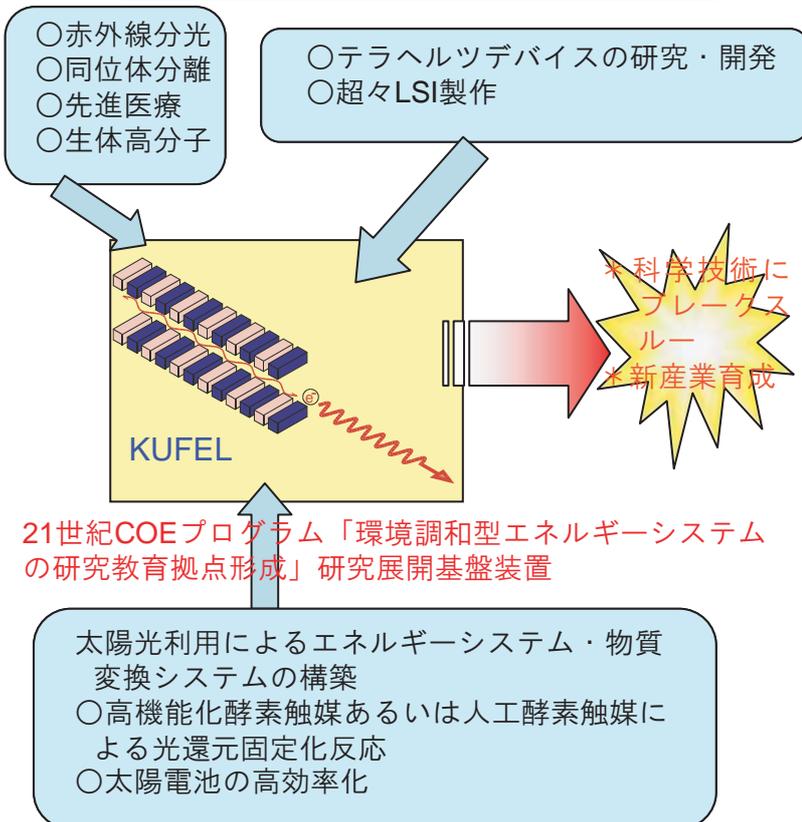


自由電子レーザーとは、従来の自然界にある原子や分子の束縛電子のエネルギー準位を利用するレーザーとは異なり、図のように高エネルギー電子ビームと、アンジュレータが作る周期的交代磁場を使用してレーザーを発生するものです。

広い波長範囲にわたって連続的に波長可変であり、原理的には高いピークパワーがとれ、効率がよく、通常のレーザーでは不可能な波長領域での発振も可能である等の魅力を備えた次世代のレーザーとして注目・期待されています。

加速器を使用するため、従来の装置は大型で高価でしたが、KUFELはその問題を解決するものです。

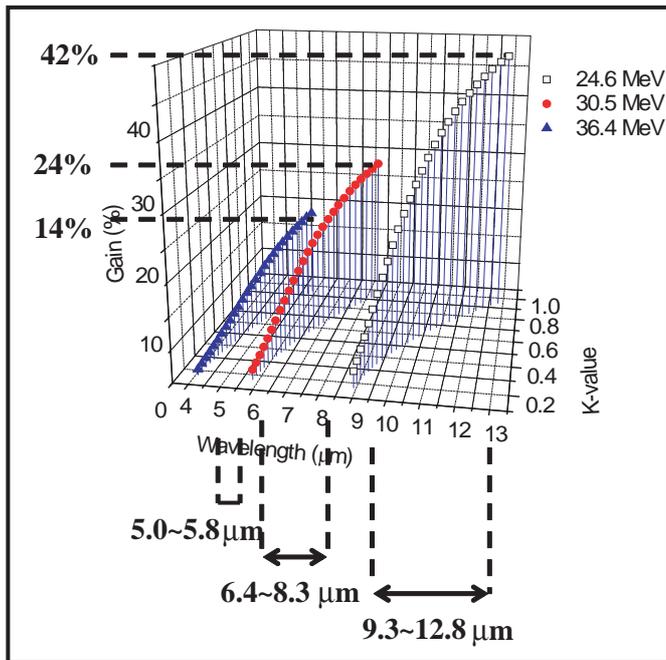
## 小型新量子放射エネルギー装置利用例



KUFELは、小型化のために焦点を絞ってはいませんが、赤外～遠赤外の広い範囲で波長可変で、また、アンジュレータを工夫すれば偏光可変にもなり、非常に高い選択性を有する波長可変なコヒーレント光源です。KUFELは、先進エネルギー基盤研究装置として、左図のように、色々な研究に使用されることが期待されています。

また、赤外線分光、生体研究、デバイス研究等は、他の分野の研究にも関連しているので、将来的には学内外の方々にも利用していただける装置です。

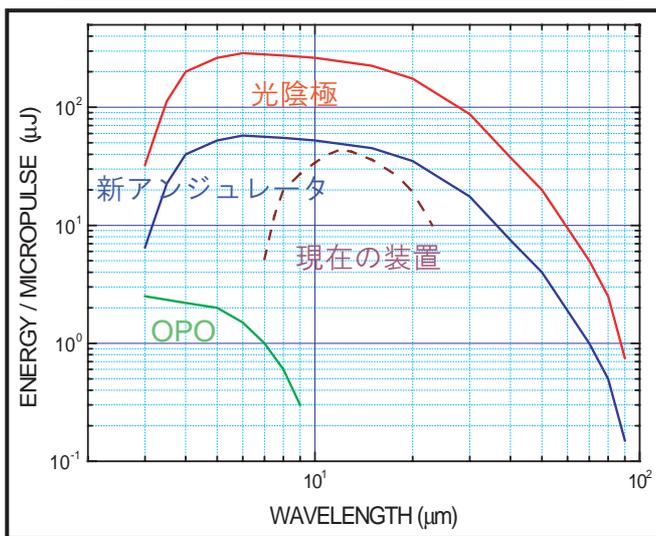
## KUFELで予想される 自由電子レーザーのゲイン



KUFELは、化学研究所の加速器施設にて建設されて、既に約30 MeVまでの電子加速に成功しています。この度、北2号棟の再開発によって放射線遮蔽施設を増強して完成した量子光・加速粒子総合工学実験棟に移転して、再構築されています。

左上の図は、加速実験と計算機シミュレーションによって明らかになった電子ビームの性質と、現在のアンジュレータの仕様から計算したFELのゲインです。その結果、下方に示した波長範囲での自由電子レーザーの発振が可能です。

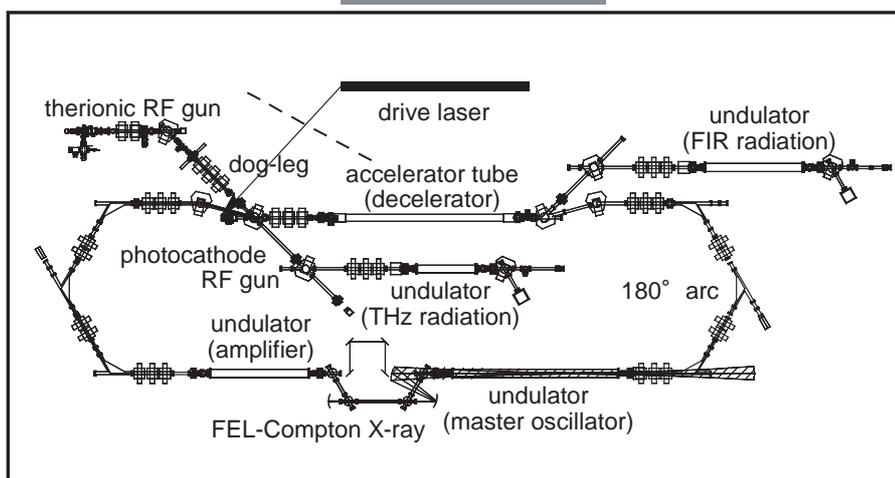
## KUFELで予想される マイクロパルス当りのレーザーパワー



左中央の図は、KUFELで予想されるマイクロパルス当りのレーザーエネルギーを示したものです。

現在の装置で可能なもの、新しいアンジュレータを使用して可能なもの、将来光陰極を使用して可能になるものを予想しています。OPOは、通常レーザーを非線形効果を利用して変調することによって可能なものですが、比較のために示しています。

## 将来のKUFEL



KUFELは、将来的には左図のように、異なる目的に対応したアンジュレータを、数箇所に増設することによって、幅広い特性の自由電子レーザーの発生を目指しています。

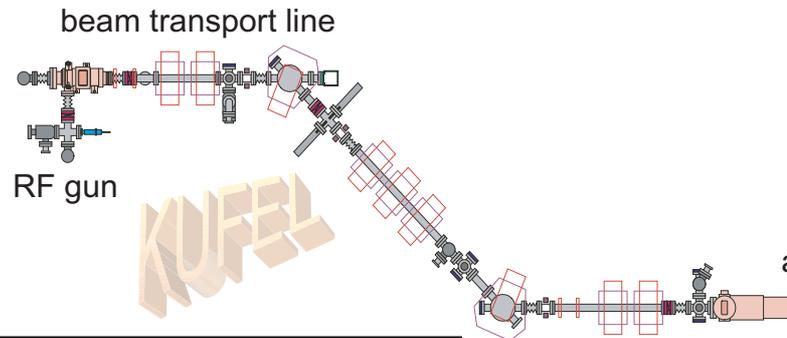
また、自由電子レーザーに使用した電子ビームを、加速管に戻して減速して、加速用高周波電力に還元することによって、エネルギー効率を上げると共に、遮蔽の負担を軽くすることで、簡便なシステムの実現を図る予定です。更に、発生した自由電子レーザーと電子ビームの相互作用 (FEL-Compton backscattering) により、数keVのX線を発生することも計画しています。

## 高周波電子銃



電子入射器としては、小型化と高輝度化を同時に図るために、4.5空胴の高周波電子銃を開発・試作しました。熱陰極を用いた簡単な高周波電子銃により、全長236 mmですが、約9 MeV、平均電流約1.6 Aまでの高輝度な電子ビームを発生できます。現在、更なる高輝度化のための研究が行われています。

高周波電子銃を出た電子ビームは、電子ビーム輸送系によって整形され、加速管に輸送されます。



### RF Gun

Frequency	2856 MHz
Structure	side-coupled 4.5 cells standing wave
Cathode	thermionic
Effective Length	236 mm

## クライストロン装置



クライストロンは、高周波電子銃や加速管での、電子ビームの加速に必要な高周波電力を供給する装置です。KUFELでは、2台のクライストロン装置を用い、高周波電子銃のためにピーク出力10 MW、加速管のためのピーク出力20 MWまでの電力増幅を、最大パルス幅10 ms、最大繰り返し10Hzで行います。また、安定した自由電子レーザーを発生させるために、高安定度(<0.5 %)で高平坦度(<0.3 %)の高周波電力を発生できる、特殊な電源装置(モジュレータ)が導入されています。

クライストロンで増幅された高周波は、導波管を通して高周波電子銃や加速管に供給されます。

### Klystrons

Frequency	2856 MHz	
Output	10 MW	20 MW
Typical Gain	51 dB	48 dB

### Modulators

Voltage	170 kV	230 kV
Current	140 A	230 A
Pulse Width (flat top)	10 μsec	
Repetition Rate	10 Hz	
Ripple	<0.3 % p-p	

## 加速管

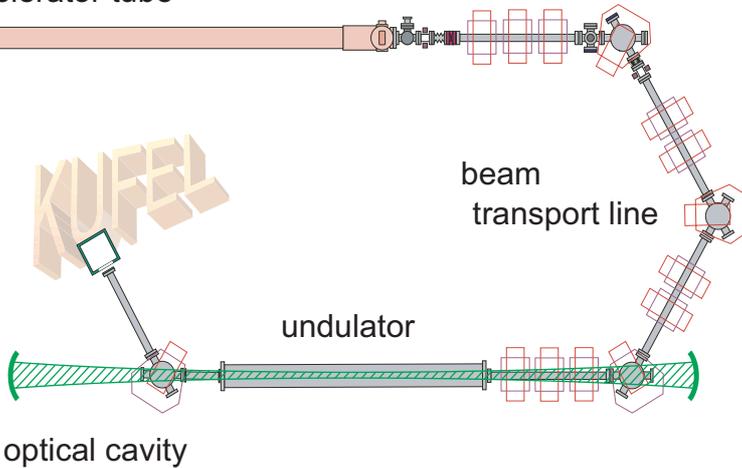
加速管は、電子銃からの高輝度電子ビームをさらに、約40 MeVまで加速する装置です。ここで使用しているものは、周波数2856 MHzで動作する進行波型加速管で、クライストロンから供給される高周波電力を用いて、約10 MV/mの最大の平均加速電場を作ります。

### Accelerator Tube

Frequency	2856 MHz
Accelerating Mode	$2/3 \pi$
Energy Gain	10 MeV/m
Effective Length	2.9 m



accelerator tube



加速された電子は、さらにビーム輸送系において自由電子レーザーに適した性質を持つように整形されて、アンジュレータに入射されます。

### Expected Beam Properties

Energy	40 MeV
Energy Spread	0.40 %
Peak Current	40 A
Bunch Length	1.8 psec
Normalized Emittance	
horizontal	$11 \pi$ mm mrad
vertical	$10 \pi$ mm mrad

optical cavity

アンジュレータは、周期的交代磁場により、高速で運動している電子を蛇行させ、特定の波長の光を発生させる装置です。KUFELでは、周期長40 mm、全長1.6mの、ハルバック型平面アンジュレータを使用しています。磁極間の距離を変えることで、発生させる光の波長を、自由に制御することができますようになっています。

KUFELは発振型の自由電子レーザーなので、アンジュレータで発生した光を光共振器で往復させて、多数回増幅して、高強度にします。

### Undulator

Type	Halbach Type
Period	40 mm
Gap	26 – 56 mm
Magnetic Peak Field	0.25 – 0.05 T
K-Value	0.95 – 0.17

## アンジュレータ



# 宇治キャンパス建物配置図



ヘリオトロンJ棟

量子光・加速粒子総合研究棟(北2号棟)



京阪黄檗駅

JR黄檗駅

## 交通のご案内

## 問合わせ先

京都大学エネルギー理工学研究所  
〒611-0011  
京都府宇治市五ヶ庄  
Phone: 0774-38-3400 (代表)  
Fax: 0774-38-3411  
URL: <http://www.iae.kyoto-u.ac.jp/>

- DuET & MUSTER  
香山 晃  
Email: [kohyama@iae.kyoto-u.ac.jp](mailto:kohyama@iae.kyoto-u.ac.jp)  
Phone: 0774-38-3464  
Fax: 0774-38-3467
- 木村 晃彦  
Email: [kimura@iae.kyoto-u.ac.jp](mailto:kimura@iae.kyoto-u.ac.jp)  
Phone: 0774-38-3476  
Fax: 0774-38-3479

- KUFEL  
山崎 鉄夫  
Email: [yamazaki@iae.kyoto-u.ac.jp](mailto:yamazaki@iae.kyoto-u.ac.jp)  
Phone: 0774-38-3420  
Fax: 0774-38-3426



- JR  
京都駅より奈良線普通列車乗車22分、黄檗駅下車、徒歩7分
- 京阪電車  
中書島駅より宇治線普通列車乗車9分、黄檗駅下車、徒歩10分
- 自動車  
京滋バイパス大阪方面より宇治西ICを降りて側道を東へ約4km  
京滋バイパス名古屋方面より宇治東ICを降りて右折後約2km