量子エネルギー物理工学

核反応によって生じるエネルギーを安全かつ効率的に利用するため、
その発生と変換に関する物理および工学について研究を行っています。

1-1　エネルギー変換工学

機能流体・知能流体、数値流体力学

横峯、河原

1-2　プラズマ物理工学

核融合プラズマ、プラズマ応用

村上

1-1 エネルギー変換工学分野

エネルギーを安全かつ効率的に利用するために、その発生と変換に関する物理と工学について学修・研究しています

流体熱工学

- 乱流現象の非線形性
- 極限条件下の熱流動工学
- ナノ･ミクロスケール熱工学

混相流工学

- 多重スケールを持つ流体物理
- 気液界面の物理と熱物質移動機構
- マイクロ気泡の物理と工学利用

高精度実験
計算科学

核分裂･核融合炉工学への応用

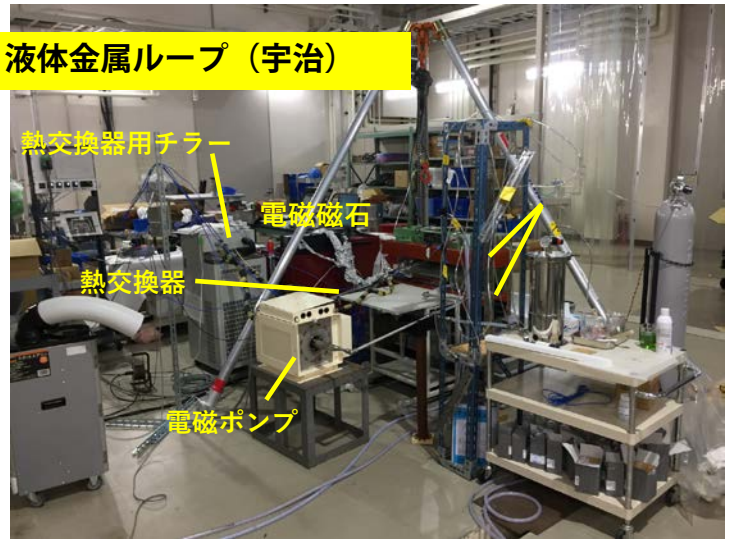
- 原子炉･核融合炉安全性
- 革新的軽水炉や高速増殖炉特性の向上
- 磁場閉じ込め核融合炉やレーザー核融合炉の冷却性能向上と高効率なエネルギー変換

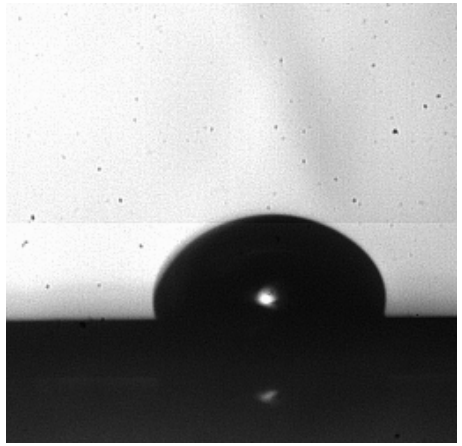
環境熱流体工学

- 熱･物質伝達の効率向上
- 高効率淡水化技術
- 新方式地熱発電

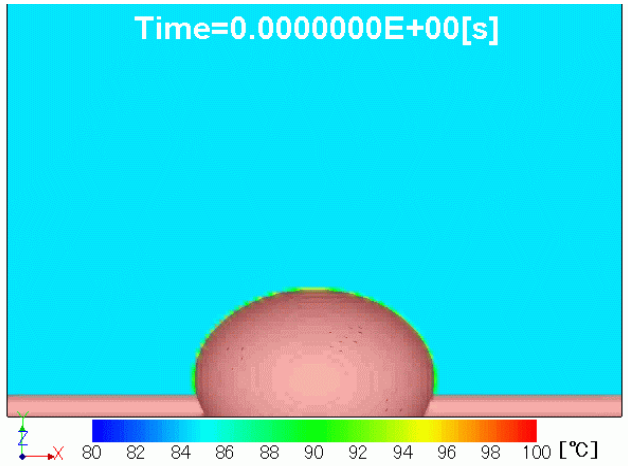
流体熱工学の基礎的な実験・シミュレーション研究

- 異相界面における熱物質輸送現象と乱流現象
- 数値流体力学の新展開
- 微細二相流現象の解明とその応用
- 液体金属MHD熱流動
- 固体粒子群と乱流の相互作用
- 機能・知能流体の基礎研究と開発、など

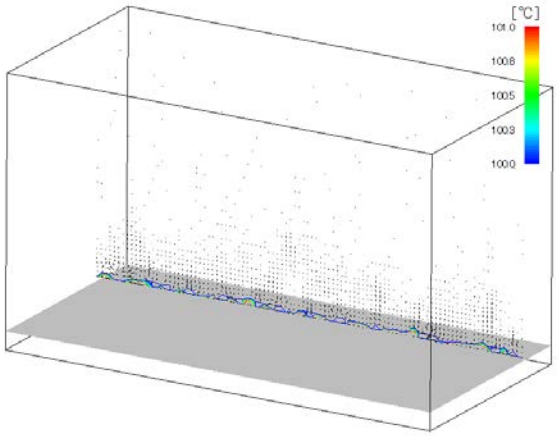




実験

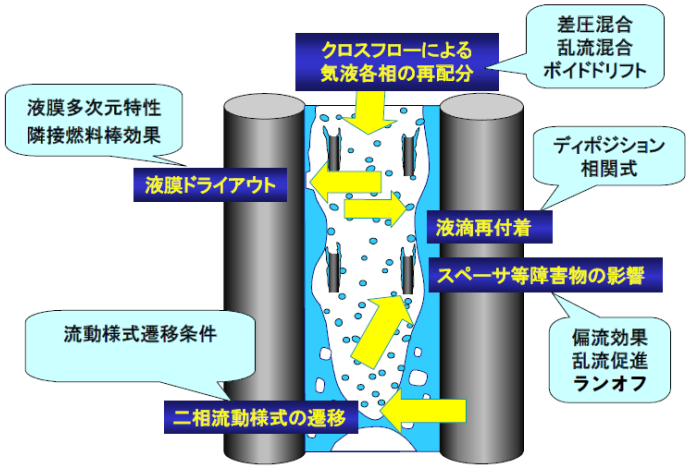


シミュレーション

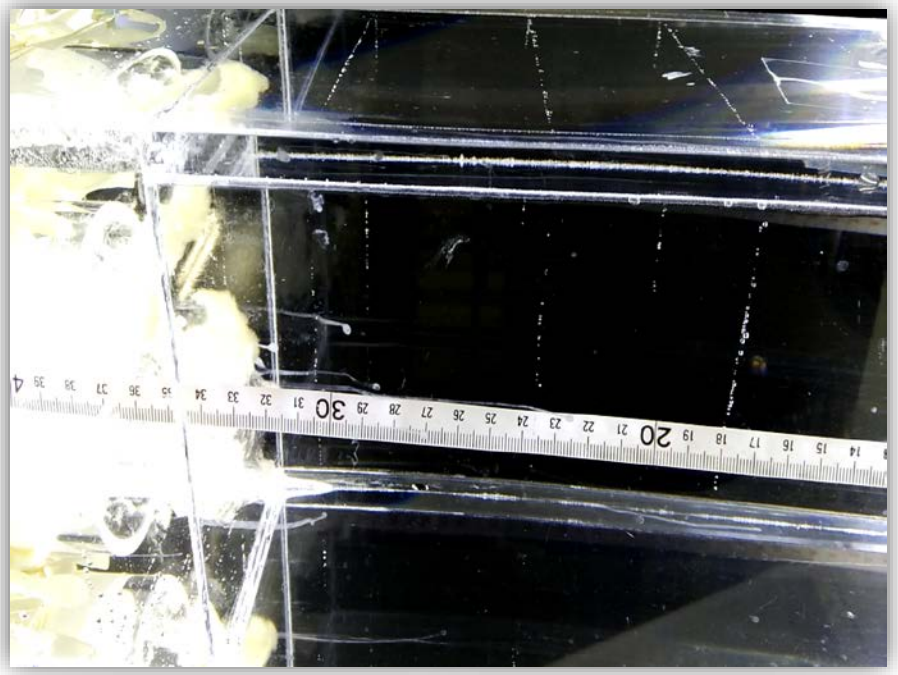


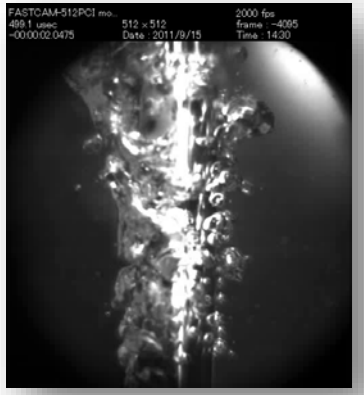
核分裂炉内の熱流体・安全工学の研究

例えば、汎用の沸騰遷移予測手法を確立するため、燃料集合体の気液二相流動特性に関する研究



沸騰水型原子炉
(Boilling Water Reactor : BWR)
燃料集合体

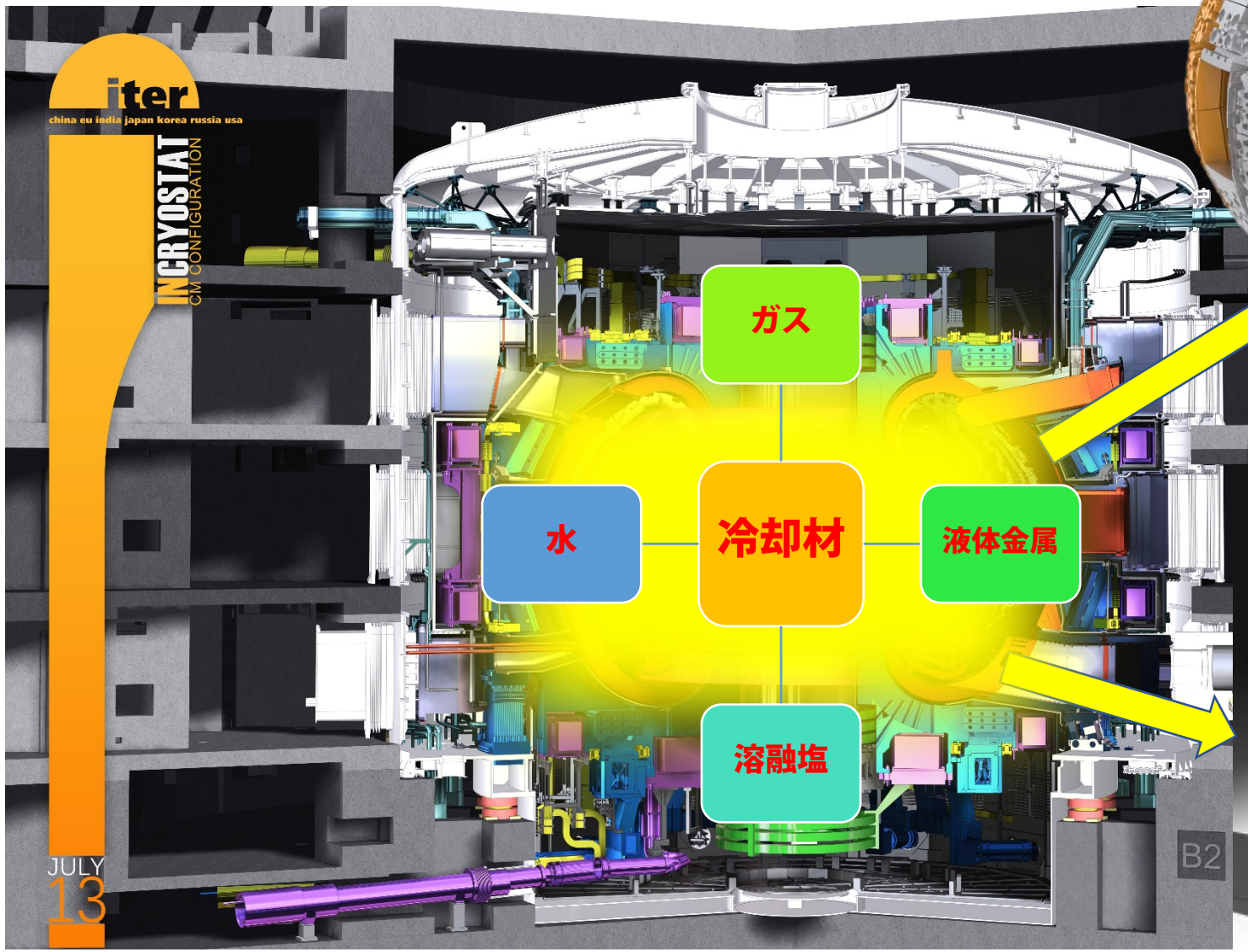




ΔT_{sub}= 0.0 K

Δt_{sub}=4.9 K

核融合炉の流体熱工学・安全性の研究



ガス

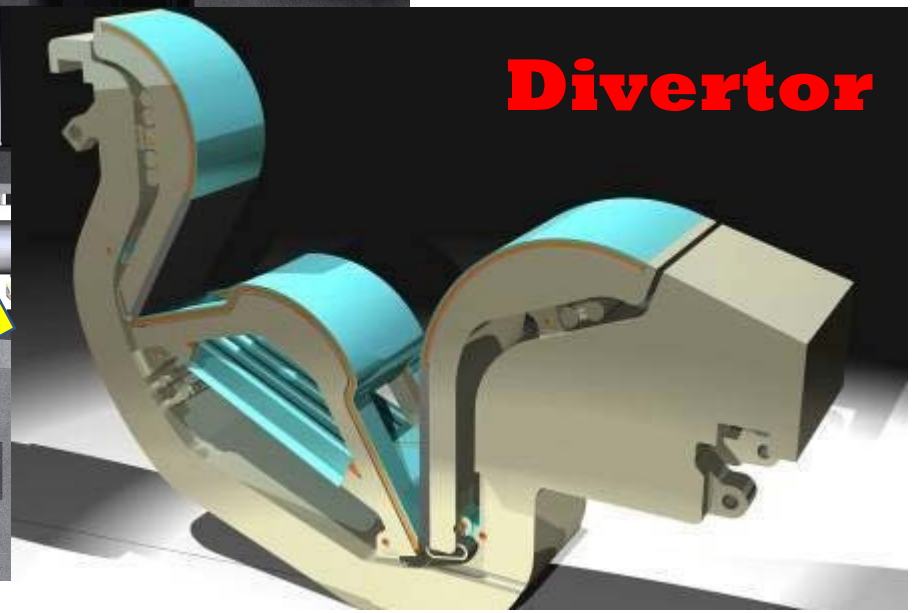
水

冷却材

液体金属

溶融塩

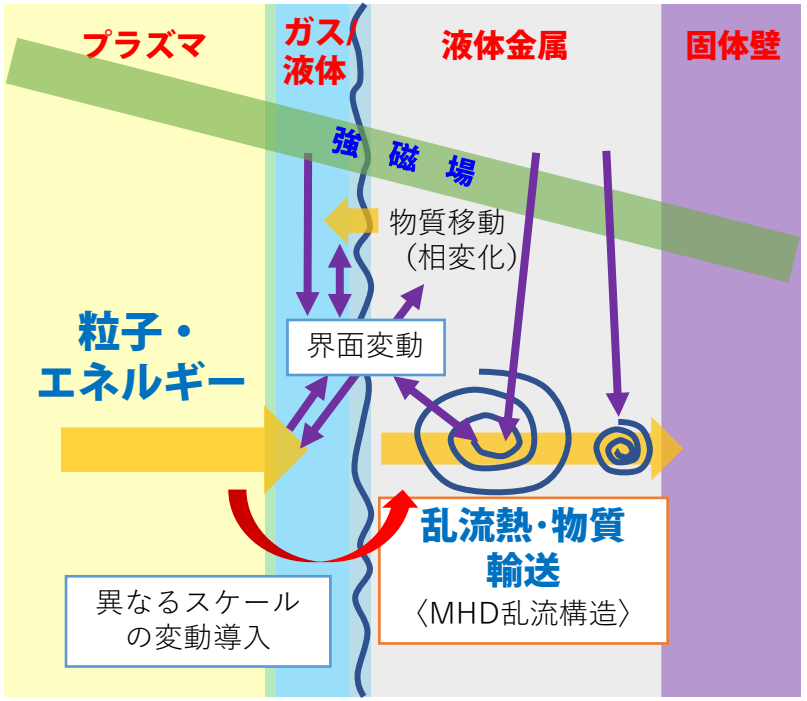
Blanket

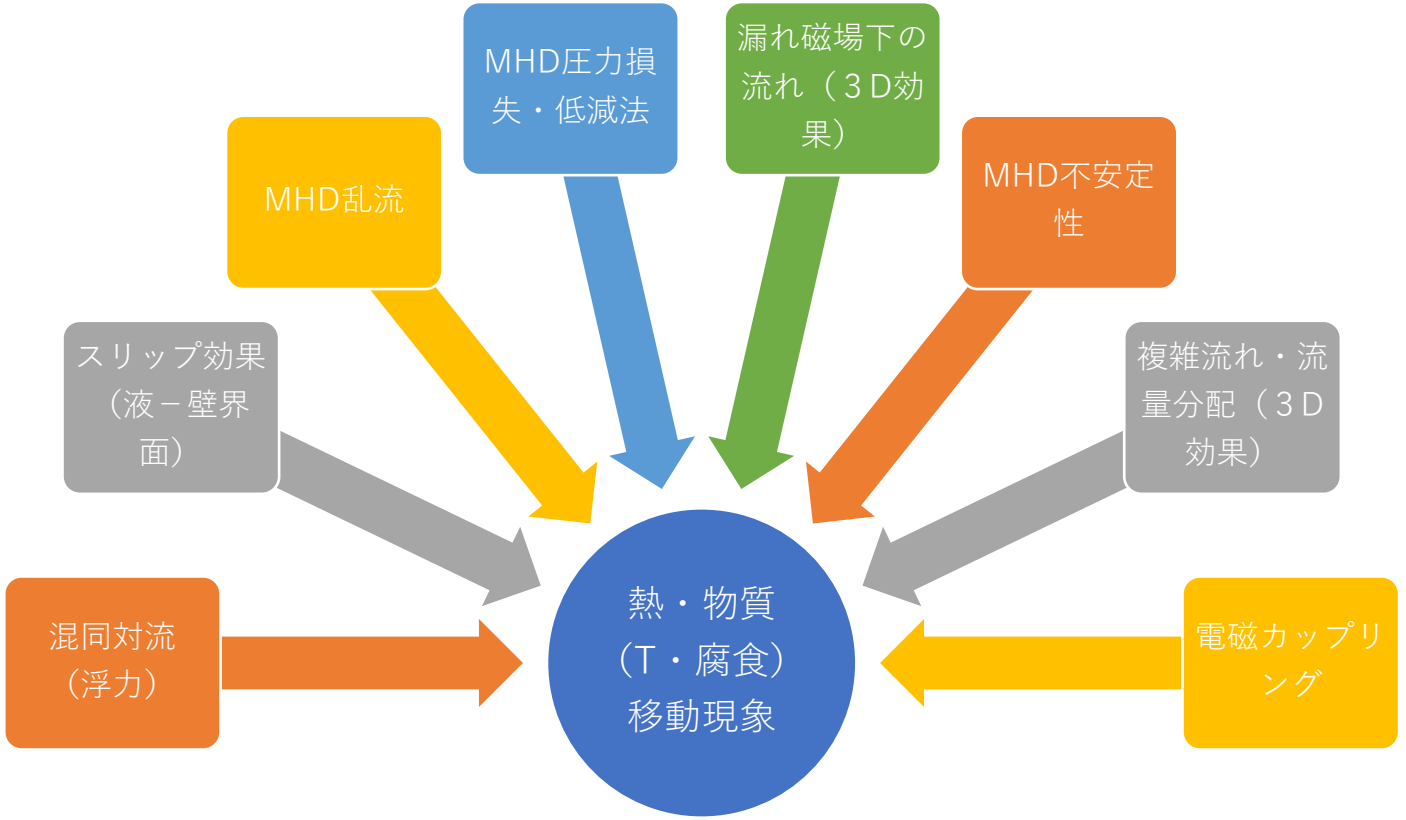


Divertor

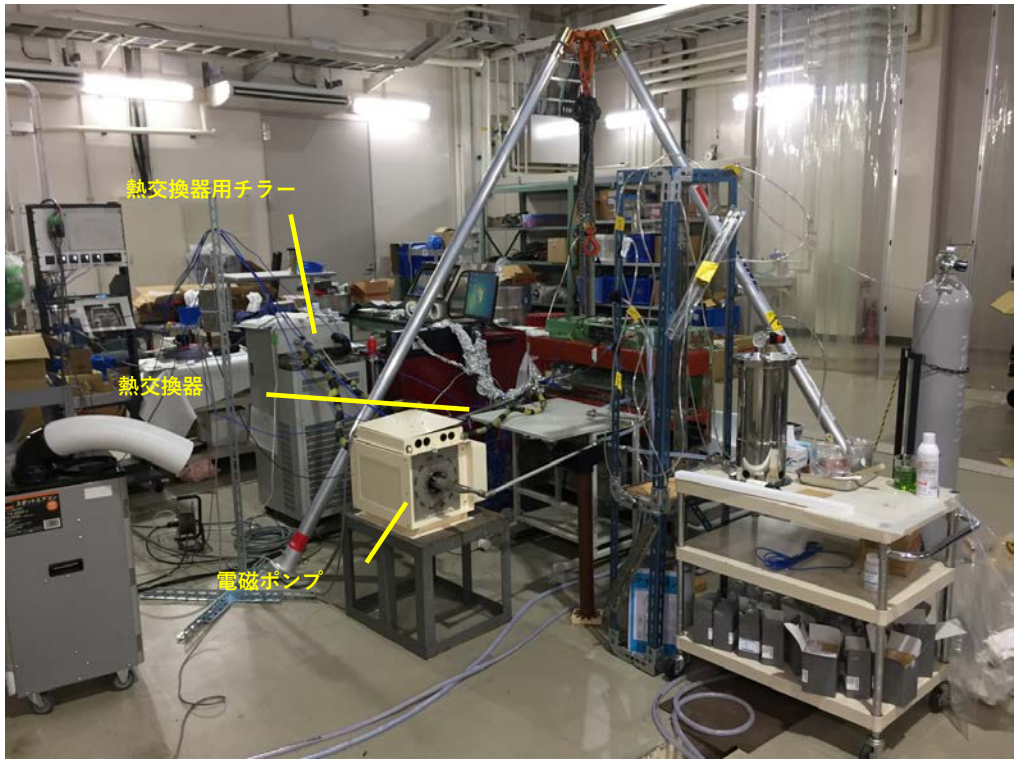
核融合炉の流体熱工学・安全性の研究

1. 液体ブランケット（日米・国内）
2. 固体ブランケット（日欧）
3. ガスダイバータ（日米）
4. 液体ダイバータ（次期日米）
5. 核融合炉材料（IFMIF）（日欧）
6. レーザー核融合（液体壁）（国内）
7. 安全性研究（日欧・国内）

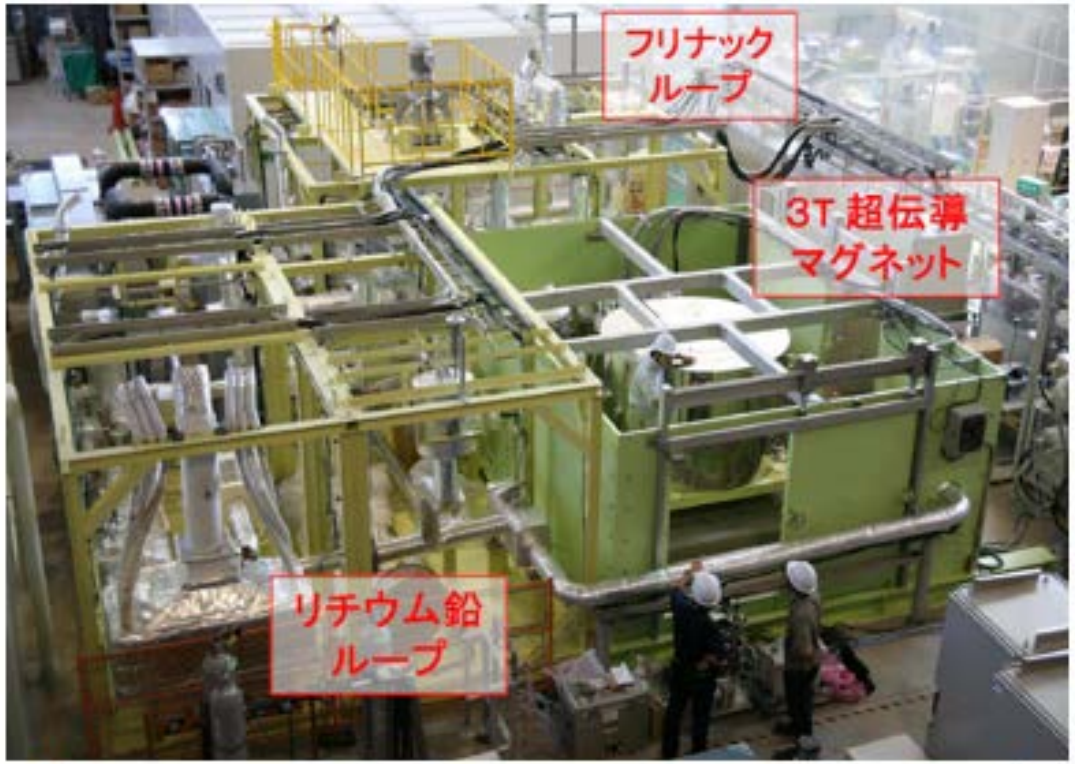




液体金属MHD乱流を核とする
界面マルチダイナミクスの解明



放射実験室（宇治）の液体金属ループ



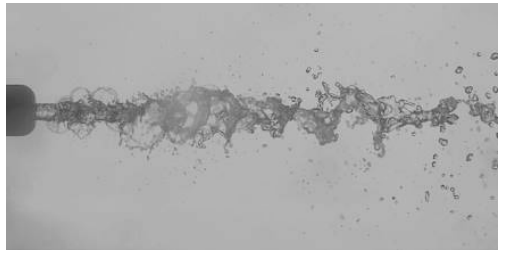
Oroshhi-2 (核融合科学研究所)

原子力システムの応用研究

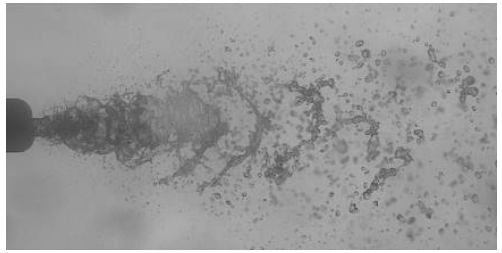
加圧水型地熱発電

(Geothermal Energy Extraction system by Pressurized water, GEEP)

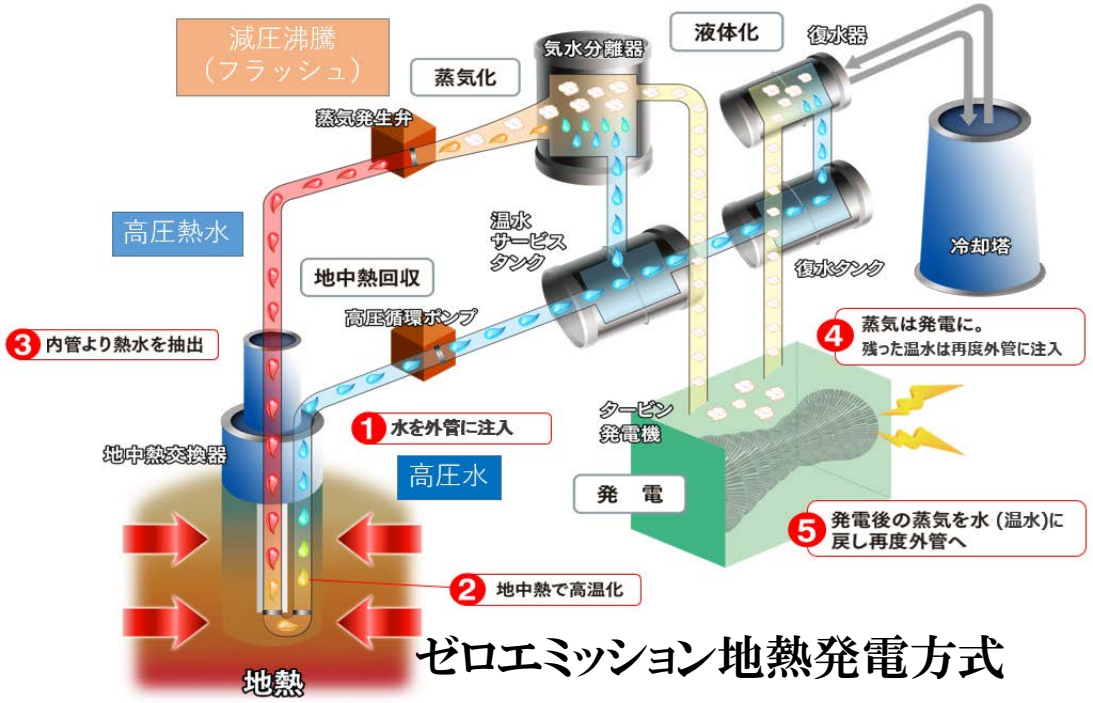
マイクロバブルによる海水淡水化の高効率化



マイクロバブル無



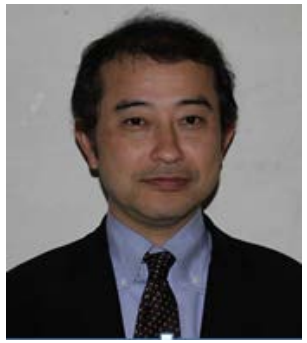
マイクロバブル有



ゼロエミッション地熱発電方式

エネルギー変換工学研究Gr

- スタッフ:　　教授:　横峯健彦　　講師:　河原全作
  秘書:　副島　聖



- 学生構成:　D3: 1名、D2:2名、D1:3名、M2: 2名、M1: 2名、B4:3名、研:1名
- 研究環境　　桂地区:　学生居室、理論研究、数値シミュレーション、小規模伝熱実験
  宇治地区:学生居室、混相流動、沸騰、液体金属MHD、
  高温高圧ガス流動実験、大型気液2相流体ループ、
  マイクロ気泡発生システム、沸騰伝熱実験設備、
  超高速カメラシステム、長焦点カセグレン顕微鏡など

- 関連科目:　流体力学、熱力学、伝熱工学、エネルギー変換工学、
  混相流工学、数値解析、英語

量子エネルギー物理工学

核反応によって生じるエネルギーを安全かつ効率的に利用するため,
その発生と変換に関する物理および工学について研究を行っています.

エネルギー変換工学

機能流体・知能流体, 数値流体力学

横峯, 河原

プラズマ物理工学

核融合プラズマ, プラズマ応用

村上

プラズマ物理工学

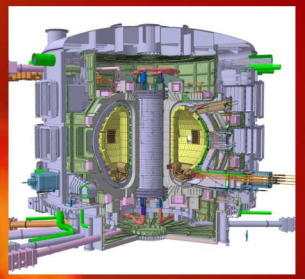
核融合を目指したプラズマの理論とシミュレーション

プラズマ物理学

非線形現象，非平衡状態の物理

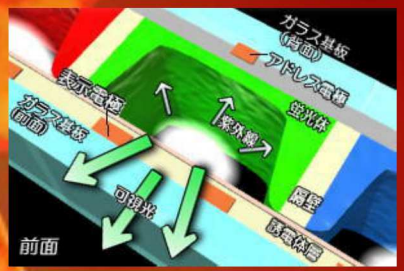
核融合プラズマ工学

核融合プラズマの解析



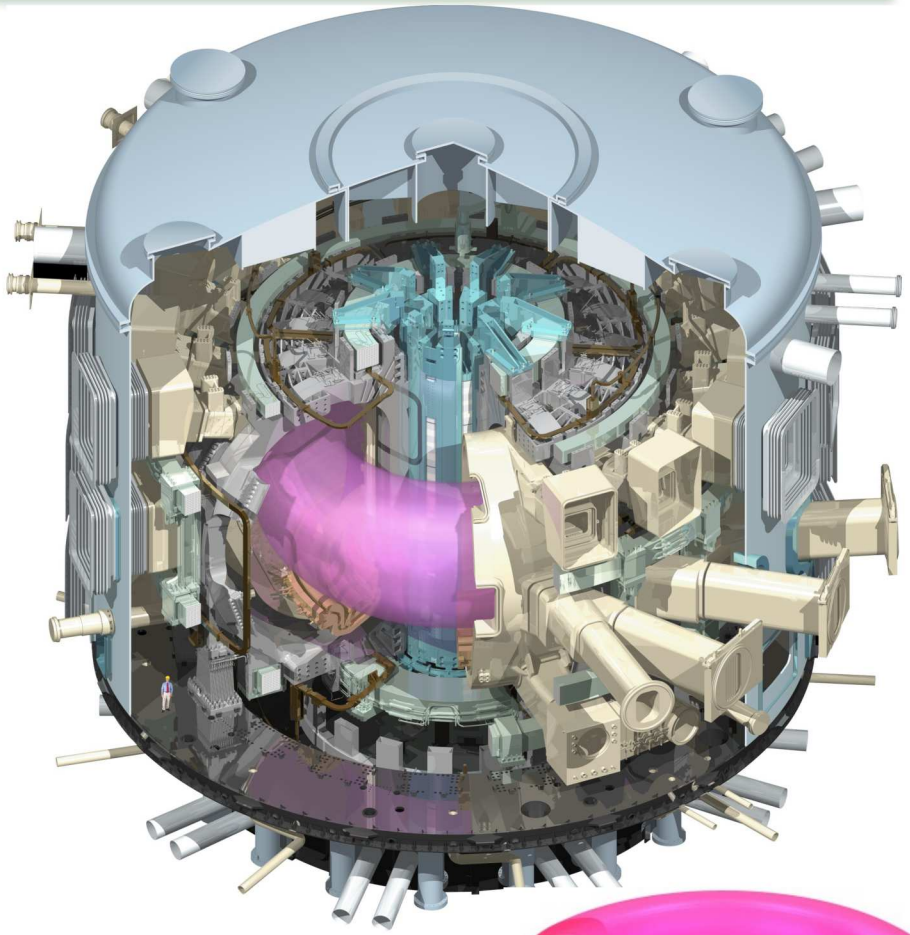
プラズマ応用

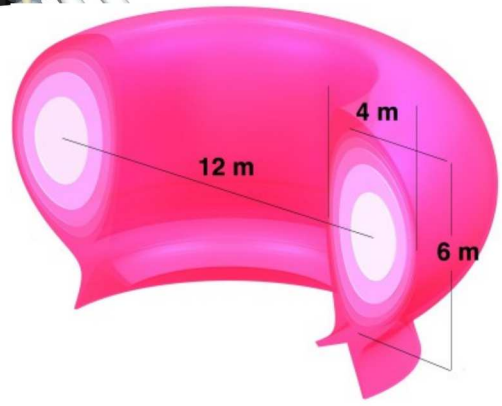
解析手法のプロセスプラズマへの応用



ITER（国際熱核融合実験炉）

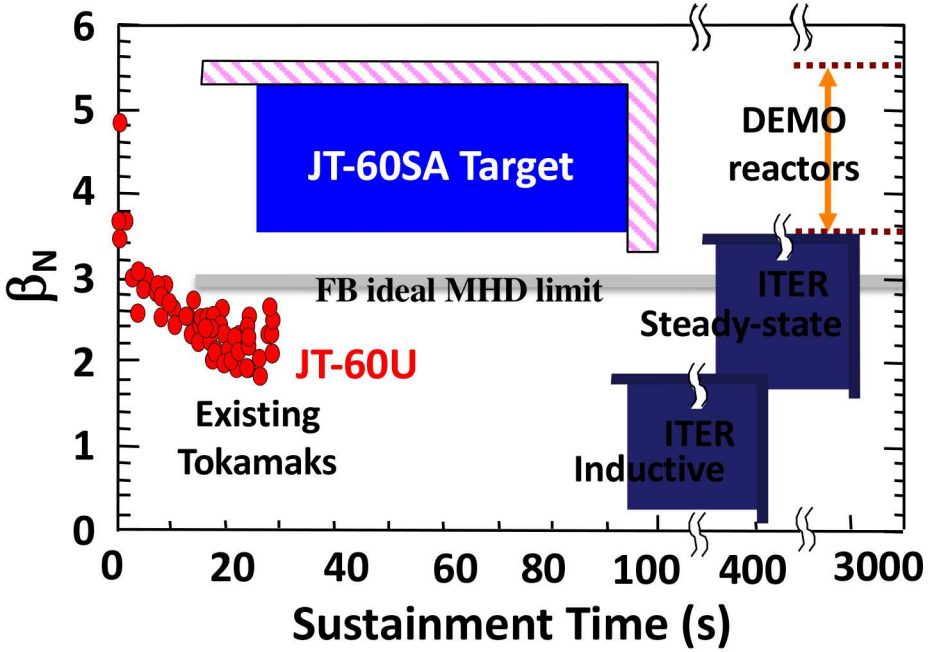
- 核融合発電を目指す国際協力
  （日、欧、米、露、中、韓、印）
- ITERがサンポールレデュランス（フランス）で建設中．2025年完成予定．
  2035年D-T燃焼実験
- 核融合開発が新たな段階へ
  =>核融合反応の維持

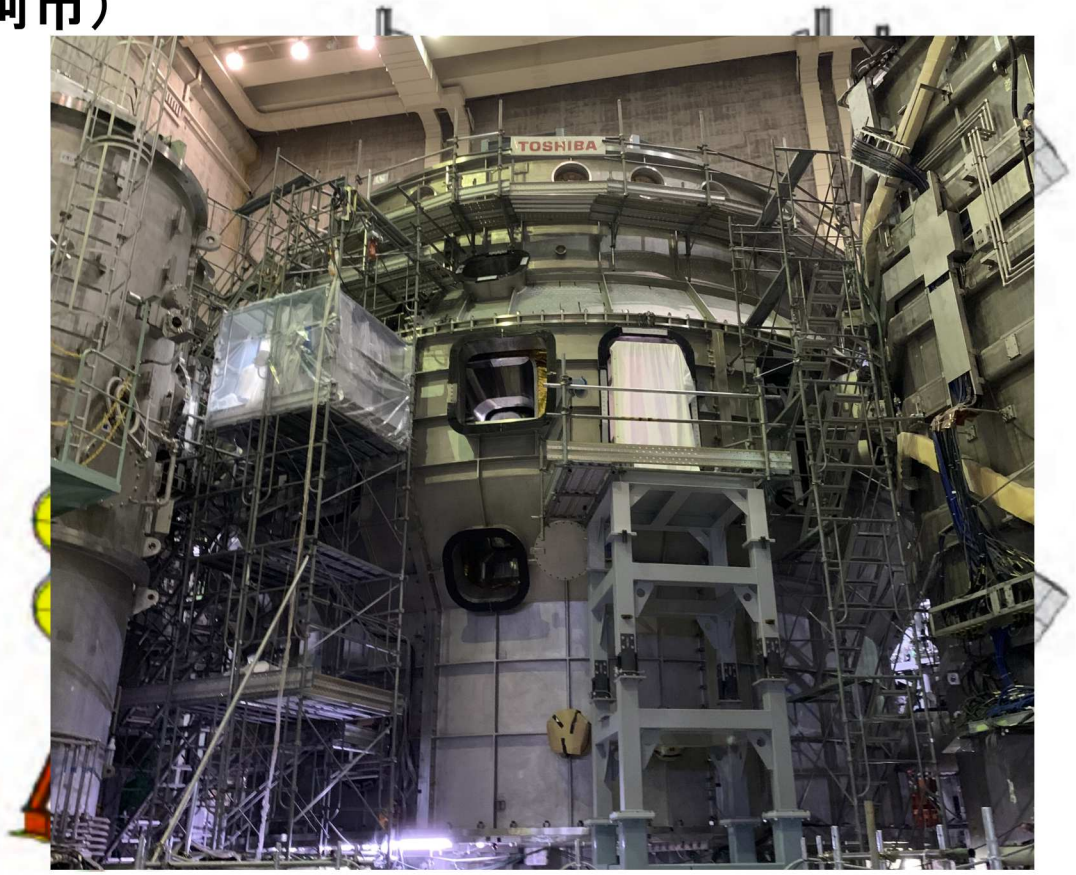




日本国内の研究状況（JT-60SA）

- JT-60SAの建設（JAEA，茨城県那珂市）
  日欧の協力事業
- 2020年9月実験開始予定





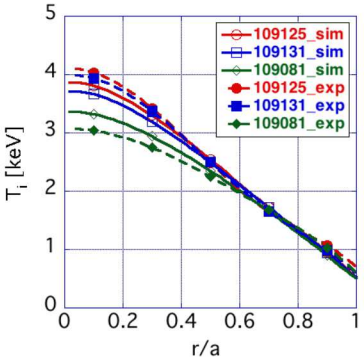
年	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31/R1	R2	R3
解体・組立			準備・環境整備		解体				組み立て						
試験・運転										試験					

総合試験　実験

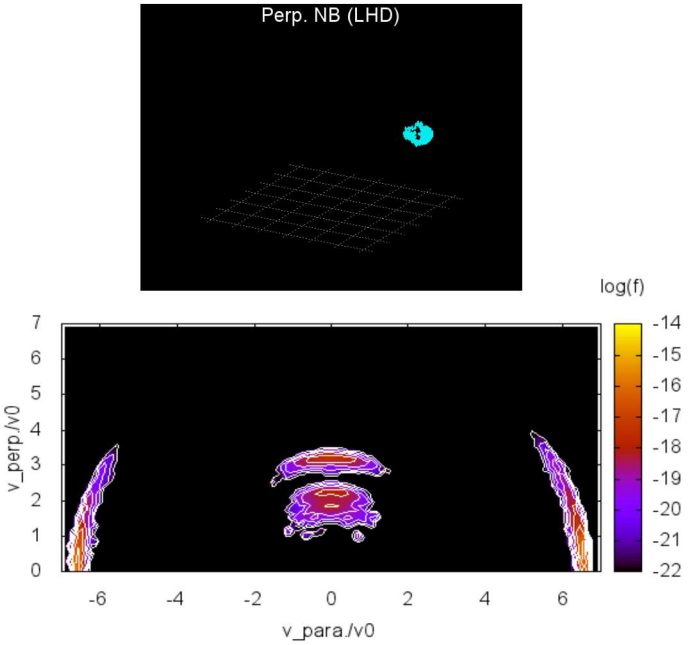
磁気閉じ込めプラズマにおける物理現象の解明と制御手法の開発

- 核融合プラズマ中の輸送現象
  - 核融合プラズマの閉じ込め性能を支配する乱流輸送機構の解明
- 核燃焼プラズマの統合シミュレーション
  - ITERプラズマの性能予測、運転シナリオ
- 高速イオンとプラズマの相互作用
  - 高速イオンの閉じ込め，減速，不安定性励起
- データ駆動科学
  - データ同化、機械学習
  - トモグラフィー手法によるプラズマ推定

実験イオン温度の再現

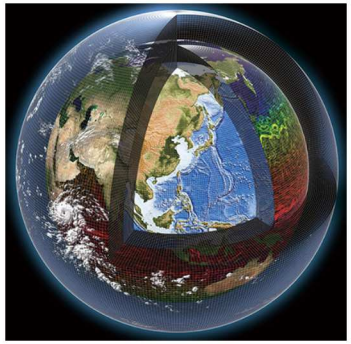


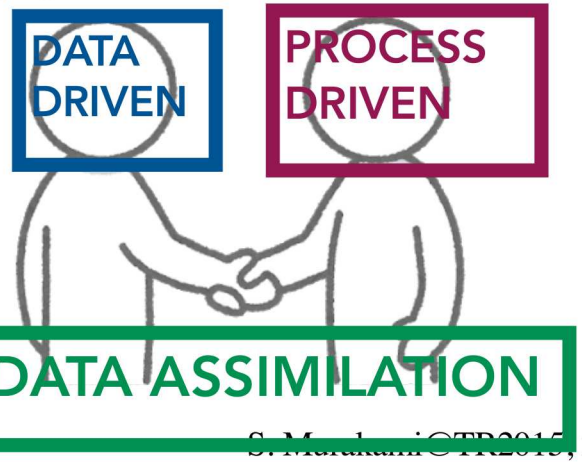
高エネルギーイオン分布



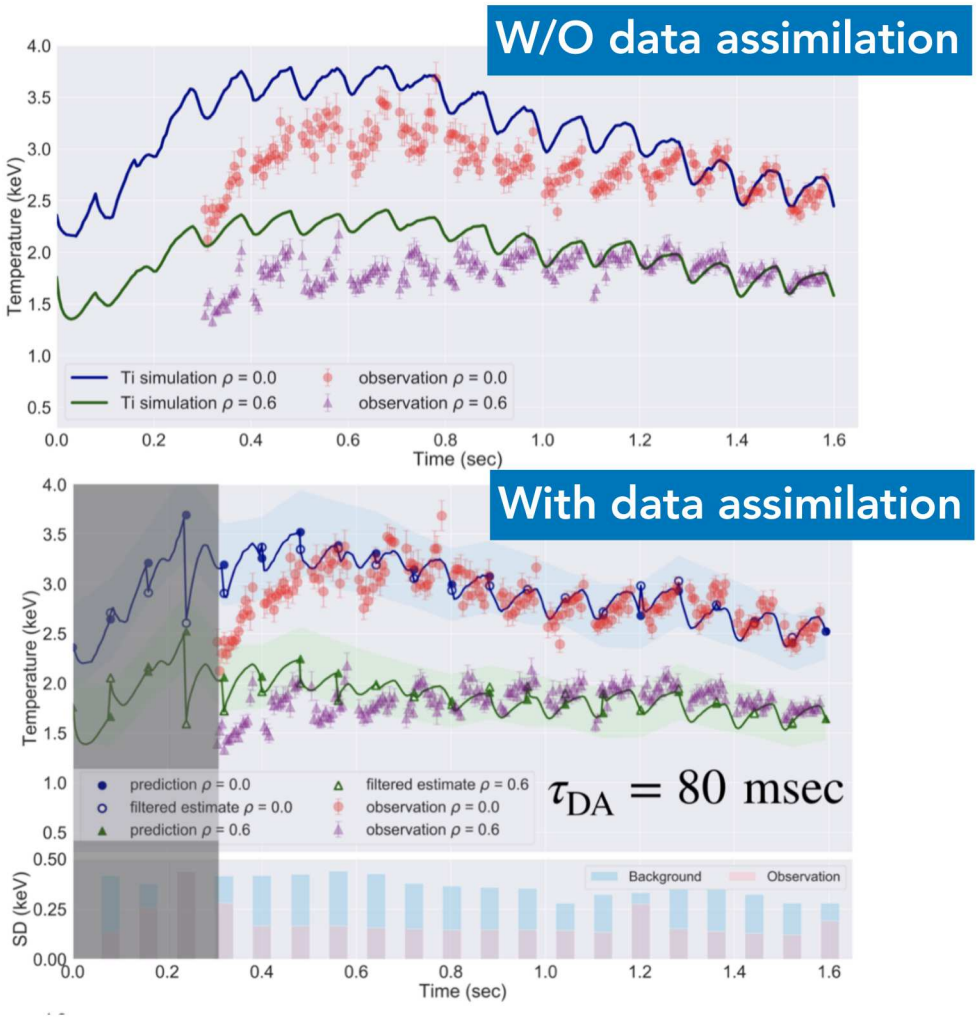
データ同化手法を用いた統合シミュレーション

- 気象分野や海洋分野において，実際の観測値を用いてシミュレーションモデルを最適化し，モデルの持つ不完全性を補うデータ同化の研究が活発に行われている．
- 本研究では，このデータ同化の手法を核融合プラズマの統合輸送シミュレーションに取り入れることで，プラズマの挙動を高精度で予測するとともにそこで用いられた物理的構造を分析することである．



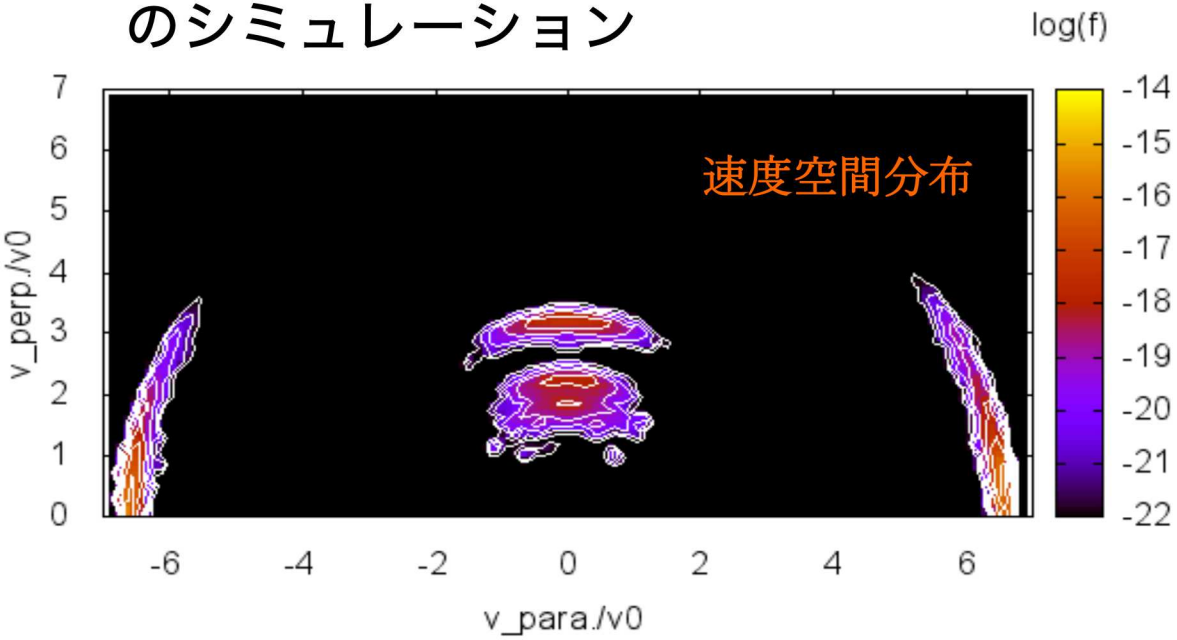


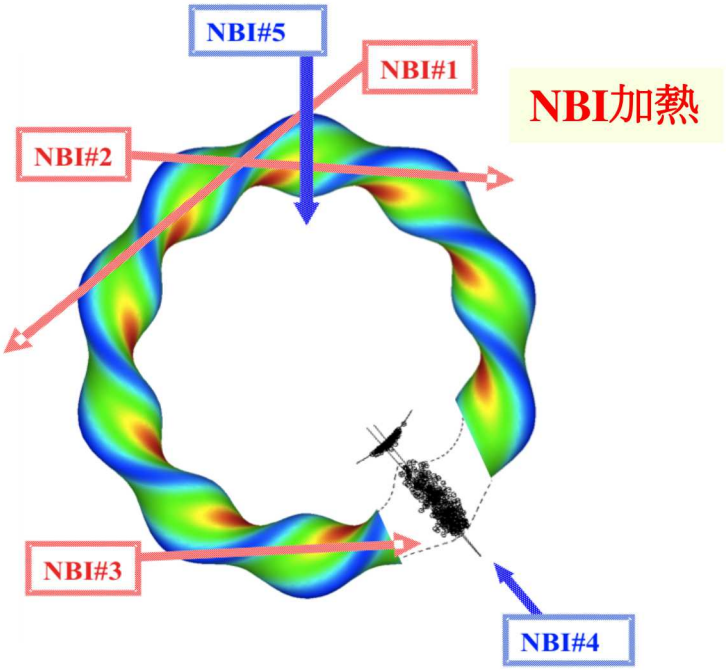
イオン温度

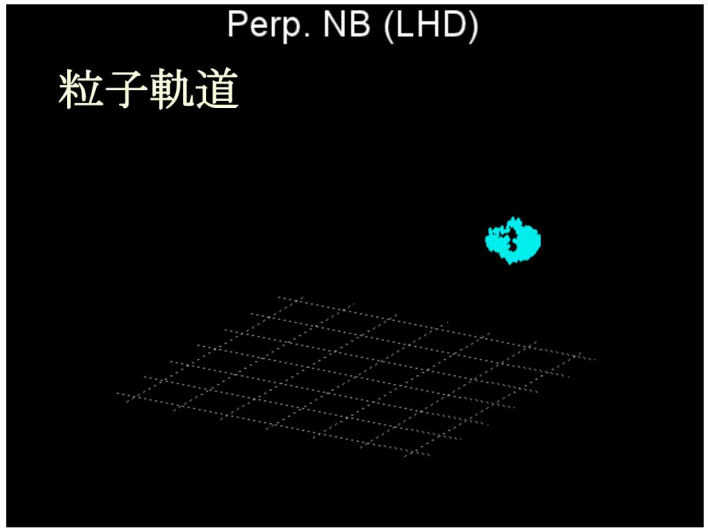


高エネルギー粒子の輸送現象

- プラズマ加熱により発生する高エネルギー粒子の輸送現象の解明
- 密度変化を逐次読み込みビーム発生分布を計算し，減衰分布・加熱分布を評価.
  (核融合研プラズマシミュレータ:
  4000CPUx6時間x5NBI)
- 高エネルギー粒子による核融合燃焼実験のシミュレーション

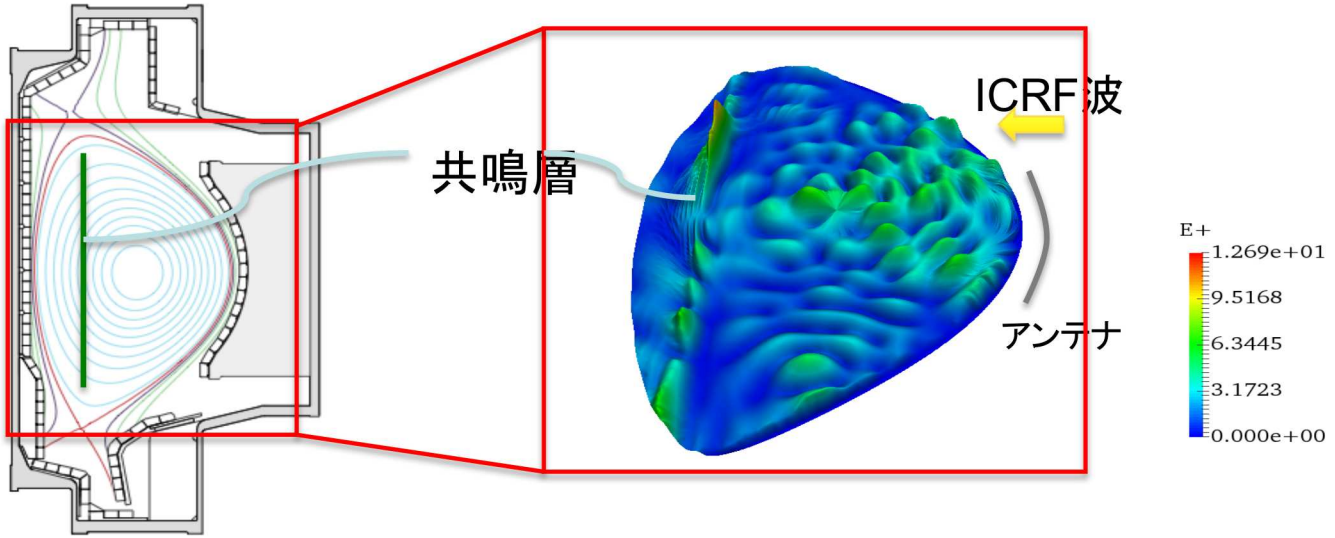




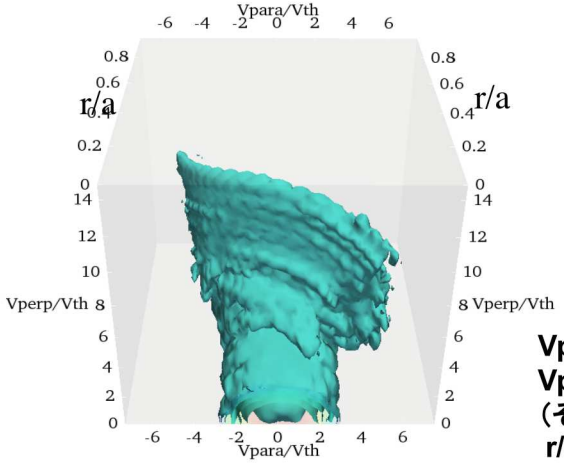


電磁波によるプラズマ加熱のシミュレーション

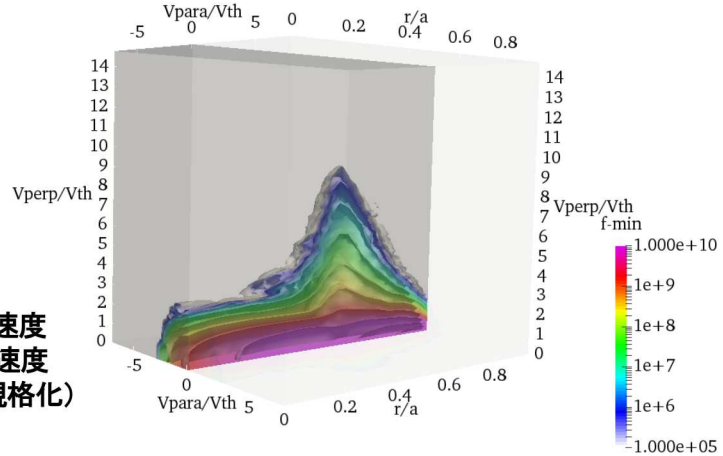
トカマク型装置(Alcator C-Mod)におけるICRF電場 E^{+}成分の空間分布



ICRF加熱による高エネルギー少数イオンの速度空間分布

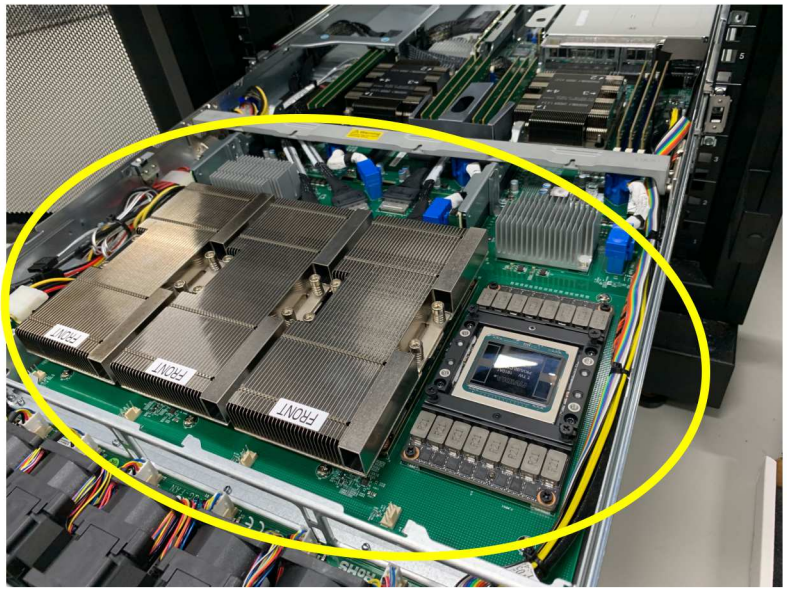


Vpara：磁場に平行方向速度
Vperp：磁場に垂直方向速度
（それぞれ熱速度 Vthで規格化）
r/a　：小半径方向位置



研究環境（計算機）

- 研究室所有計算機
  クラスター並列計算＋GPGPU
  Intel 4core Xeon 3.16GHz Dual 16台　128CPU
  Intel Xeon Gold 6240 32Core
  + NVIDIA Tesla V100 NVLink X4
- 共同研究計算機
  プラズマシミュレータ（核融合科学研究所）
  JFRS-1（量子科学技術研究開発機構）

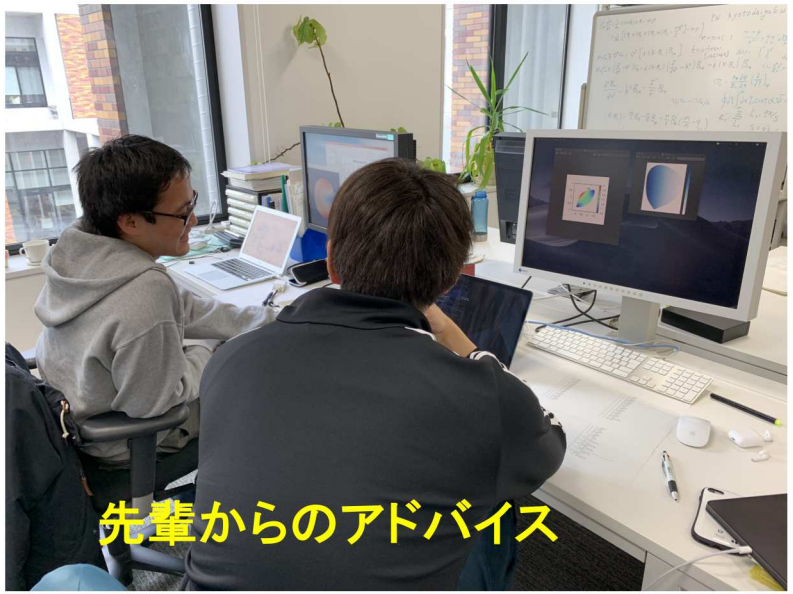


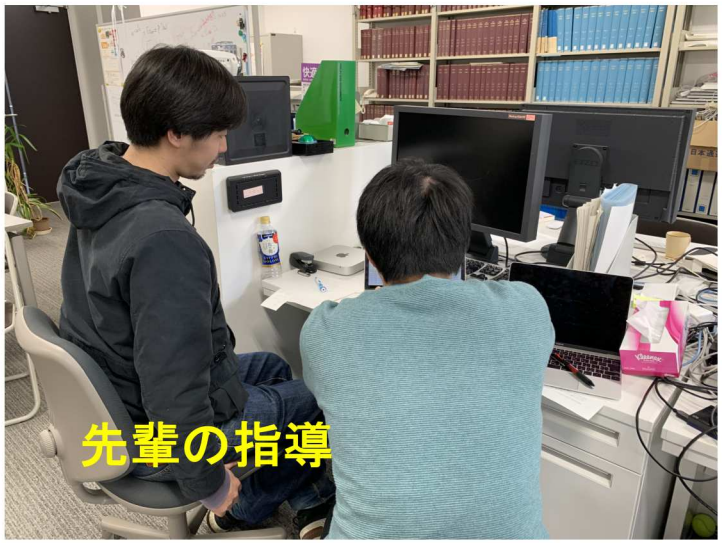
プラズマシミュレータ
2,592ノード,
82944コア
2.62PFLOPS

JFRS-1
1,370ノード,
54800コア
4.2PFLOPS

研究環境（研究室）

- ゼミによる核融合・プラズマの基礎学習
- 研究テーマ決定
  （候補もあるがある程度自由に決められる）
- 研究の実行
  各自の机・PCが基本
  PCでプログラミング・実行
  （クラスター，スーパーコンピュータ）
- 教員/先輩からの指導・アドバイス
- 国内・国際学会での成果発表・共同研究

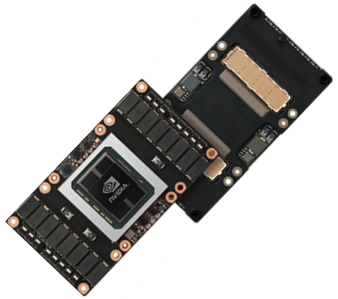

先輩からのアドバイス


先輩の指導

孤独な研究

研究室では（2020年度）

- スタッフ：教授　村上定義
- 学生構成：D３：1名，D１：1名，M2：6名，M1：2名
- 共同研究：国内　核融合研(LHD)，量研機構(JT-60SA)，京大，九大
  国外　Wisconsin Univ.　MIT（米国）IPP Max-Planck（独）
- 計算機環境　計算機クラスター，GPGPUによる並列計算



Intel 4core Xeon 3.16GHz Dual 16台　128CPU

Intel Xeon Gold 6240 32Core + NVIDIA Tesla V100 NVLink X4

スーパーコンピュータ

核融合科学研究所　Fujitsu PRIMEHPC FX100

量子科学技術研究開発機構　JFRS-1 Cray(HP) XC50

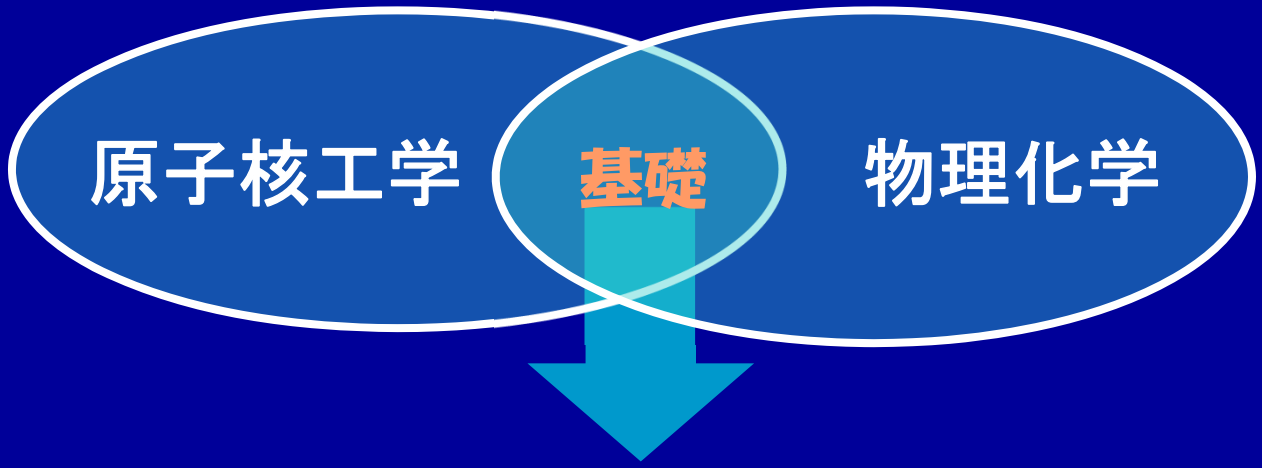
長期的な視野でエネルギー問題の解決を目指す

未知の非線形現象の解明に興味のある，目的指向の国際共同研究に関心のある人

核融合・プラズマを知ってみたい人，そんな大学院生・学部生を募集しています.

第2グループ

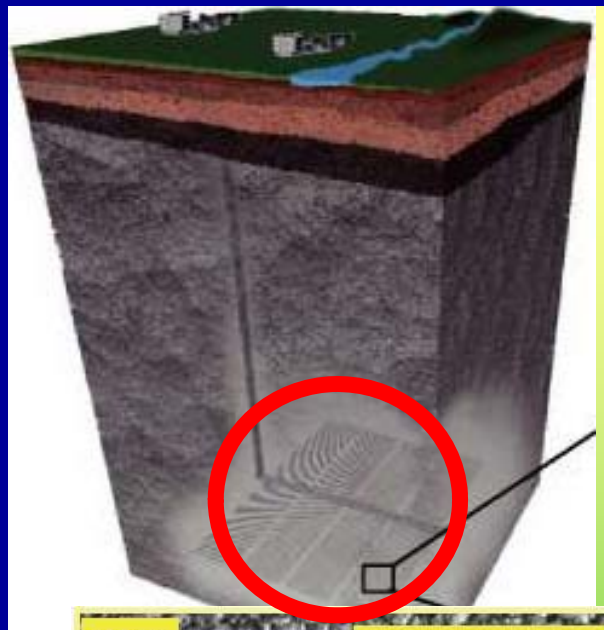
2-1. 燃材料工学　　桂
2-2. 重元素物性化学　　熊取

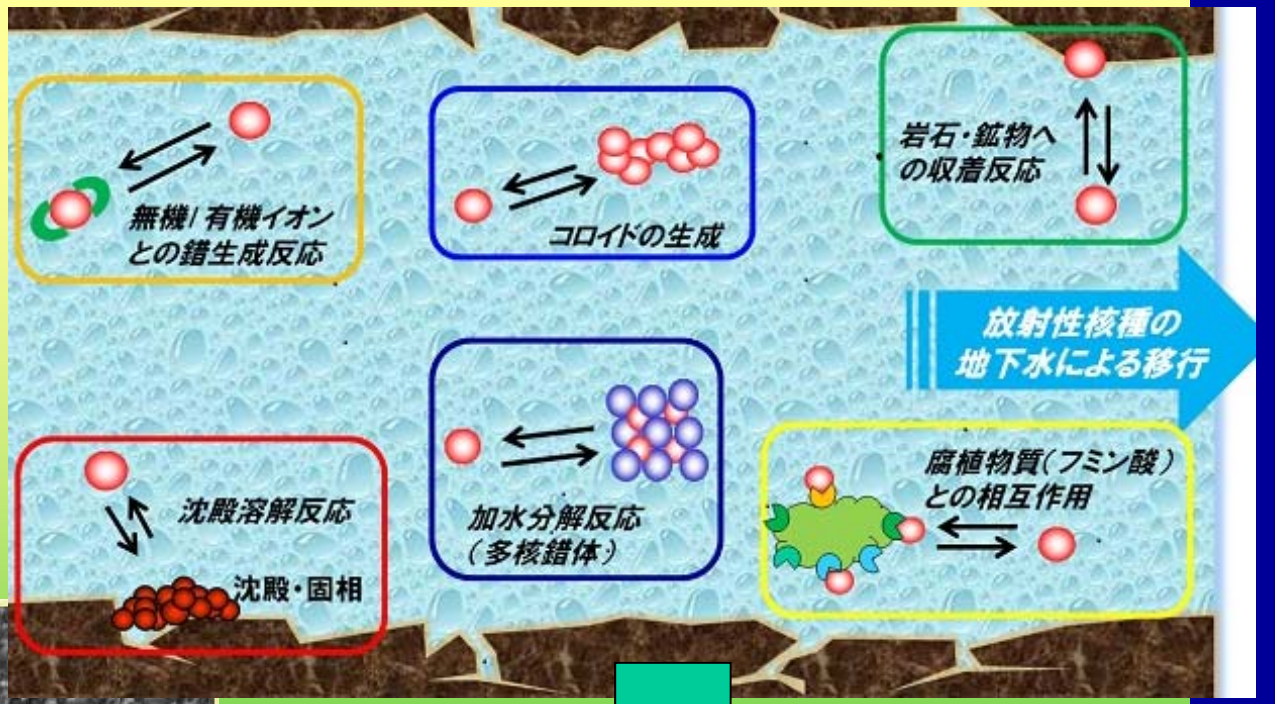


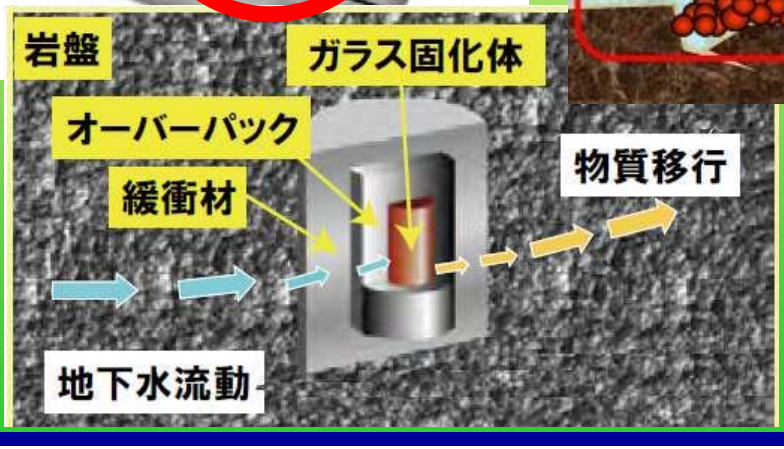
内容　原子力・核融合の材料と化学
目的　安全・環境・有効利用

高レベル放射性廃棄物の処分と環境

目的:　処分の長期安全性評価の不確実性低減
内容(基礎): 様々な核種の物理化学(化学熱力学), 環境科学







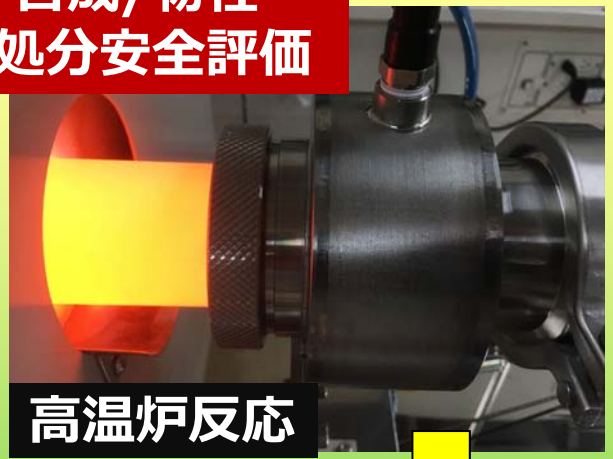
(応用)
数万年後の核種移行を予測する
熱力学反応モデル開発

アクチノイド科学がカギの福島廃炉

目的:　福島原発の廃炉，高汚染域の核種挙動/物量予測
内容（基礎）:　溶融燃料ﾃﾞﾌﾞﾘや廃棄物中のアクチノイド科学

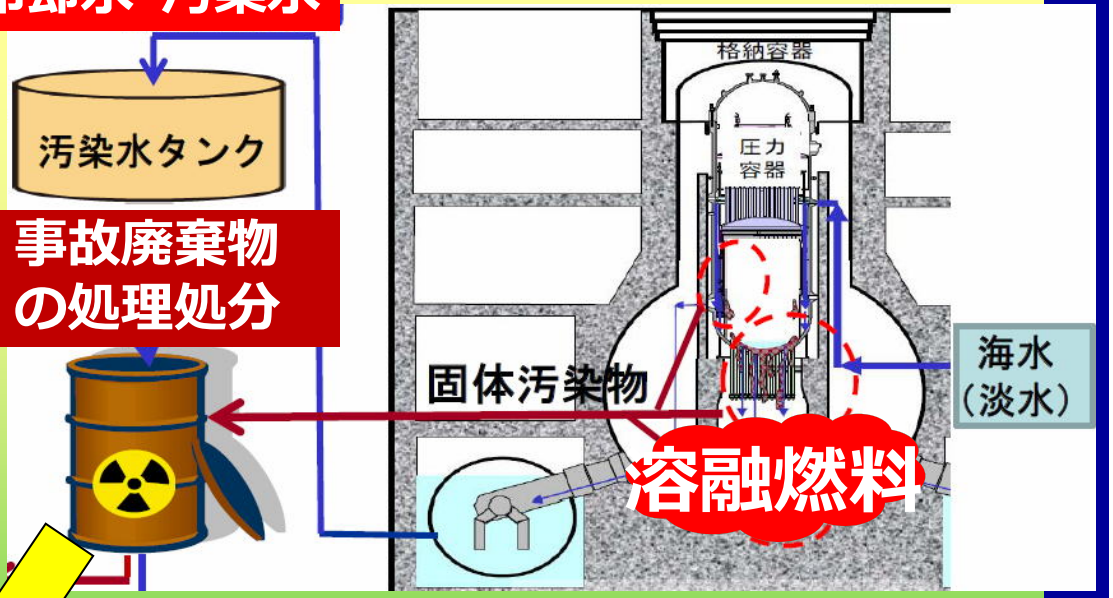
図　事故により発生する多種多様な廃棄物

模擬ﾃﾞﾌﾞﾘの
合成/物性
/処分安全評価



高温炉反応

冷却水・汚染水



（応用）
・廃棄物性状を言い当て、効果的な分別・減容処理の提案
・デブリの固体物性研究から安定化処理の提案
・我が国の廃炉ノウハウの世界基準化を目指す

アクチノイド固体・液体の反応研究の多様な協力体制　2－1

ラボで:
熱力学的研究

プルトニウム
溶解度

ウラン高温
酸化物物性

現場で:
挙動理解と予測

地下500m
での研究と
熱力学的考証

様々な学外施設で:
最先端科学の活用

高エネルギー
加速器による
状態研究など

核燃料を扱う世界有数の
ラボを保有

国内外と緊密な研究協力.
学生とのコラボ多数.

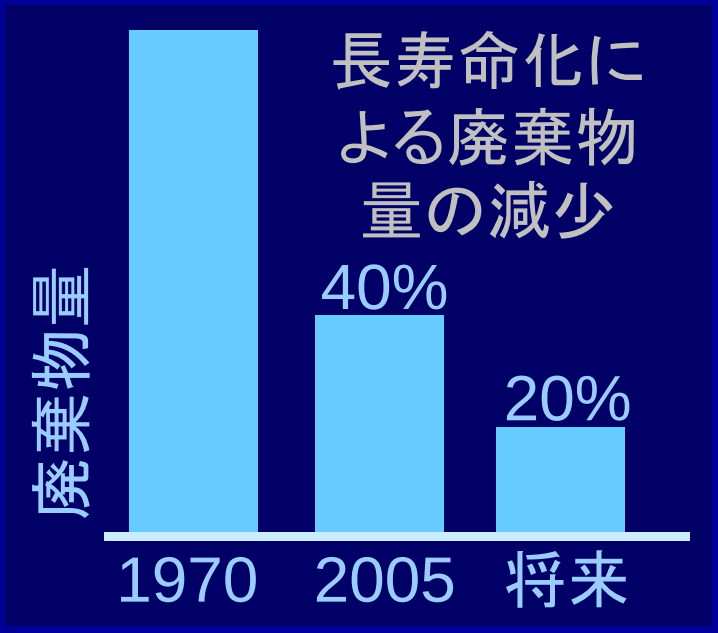
原子炉燃料の安全性

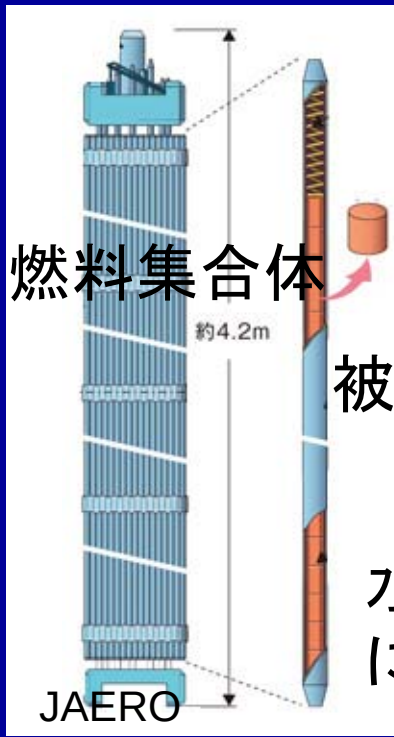
燃料被覆管の主成分

$$Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$$

通常時の目標:
廃棄物量抑制

事故時の目標:
水素発生量抑制



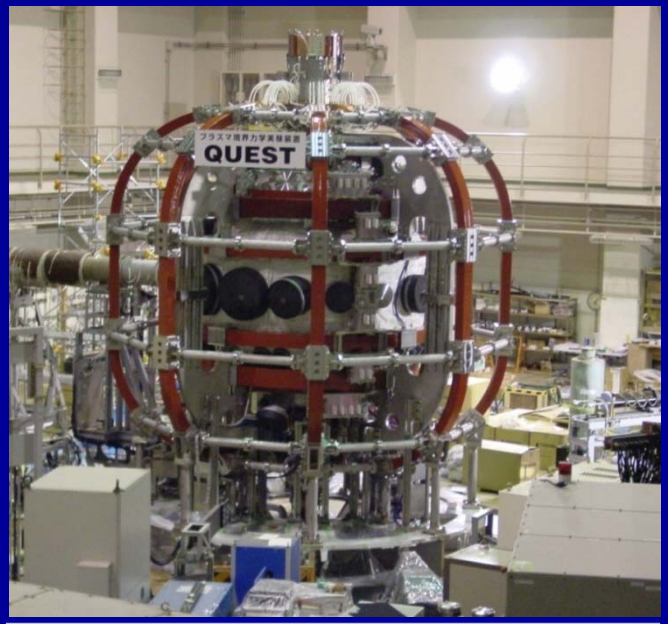


被覆管

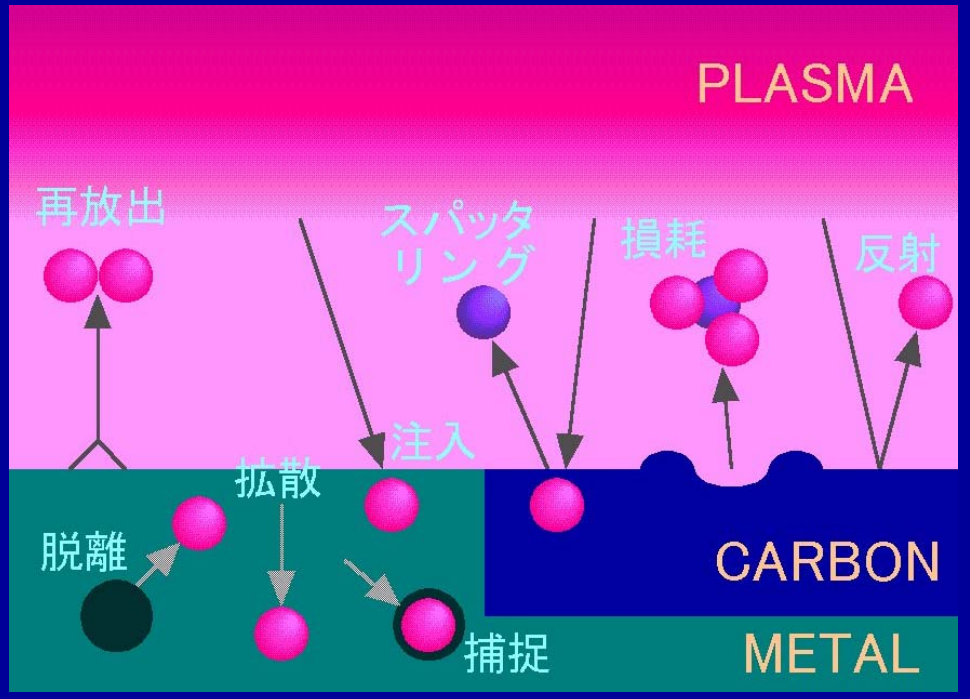
水素吸収による脆化により寿命減少

水素発生・吸収のメカニズム解明

核融合炉のプラズマ-壁相互作用



プラズマ実験装置（九州大学球状トカマクQUEST）で共同実験



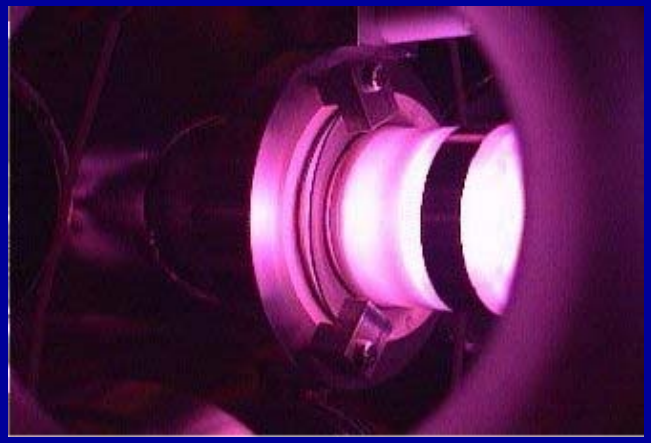
目的：　長時間プラズマを実現
内容：　素過程を探る基礎研究
＋大型装置による応用研究

→「燃焼」への第一歩

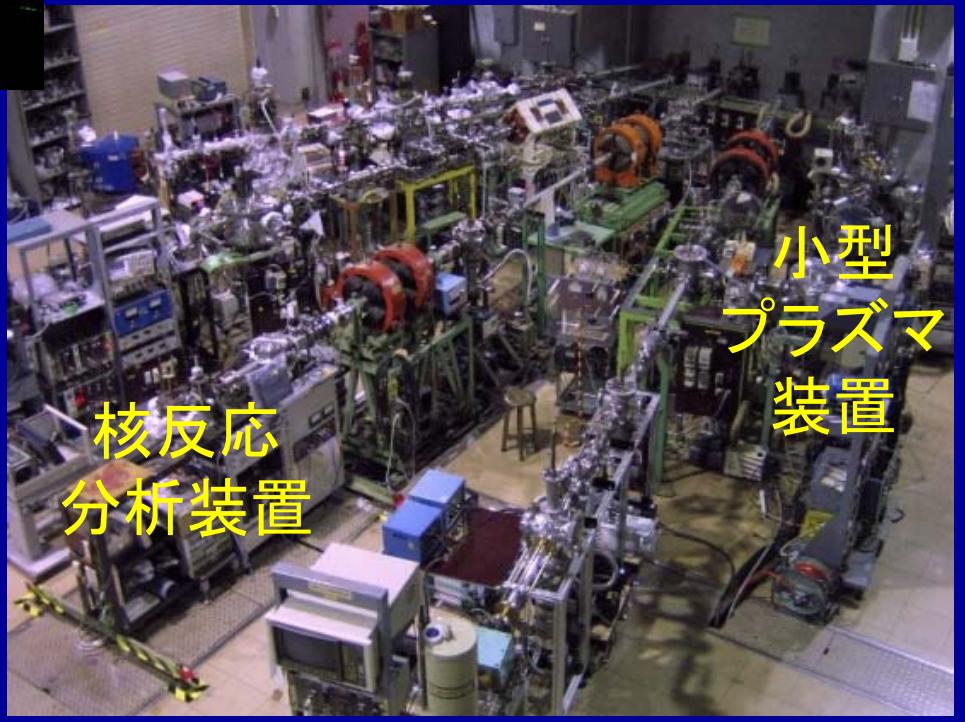
加速器の応用

マイクロイオンビーム装置

分析槽に工夫
（核反応法＋プラズマ暴露）
↓
世界唯一の分析システム

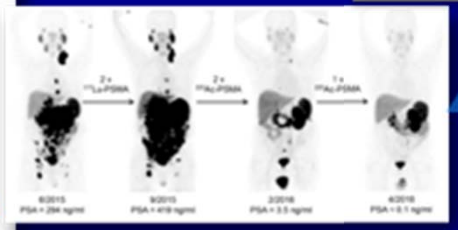


小型水素プラズマ装置



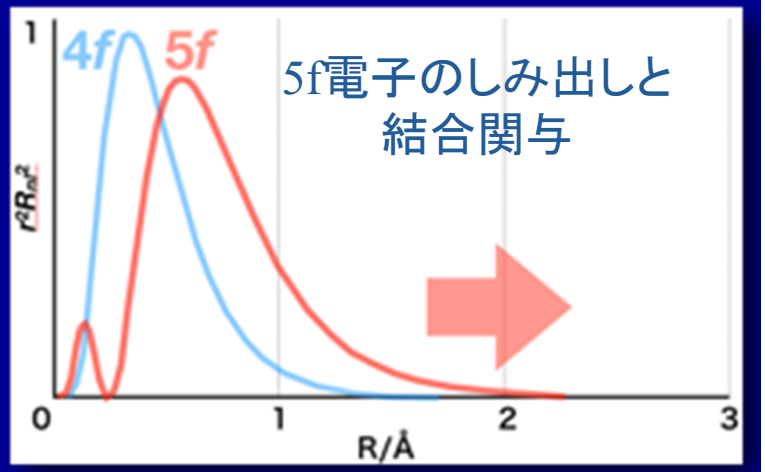
利用している加速器ビームライン

アクチノイドの興味深い性質を探り、活用し、安定化に寄与 2−2



伝播性がんの治験例[1] Clemens Kratochwil, et al., J. Nucl. Med., (2016) .

電子的性質



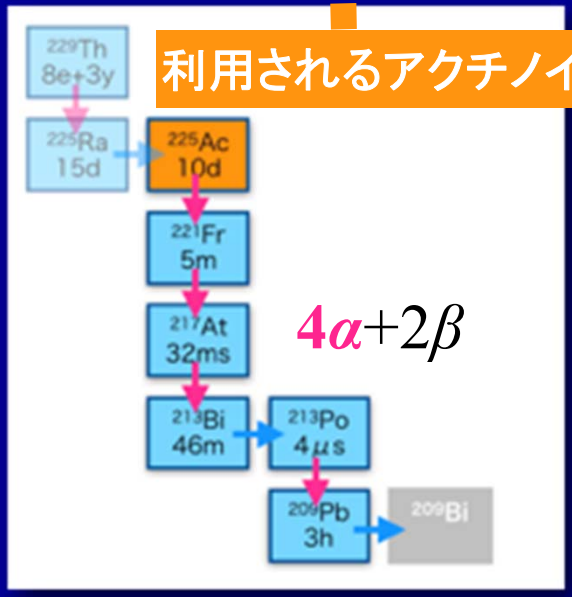
α線核医薬の原理構築と効果検証

利用

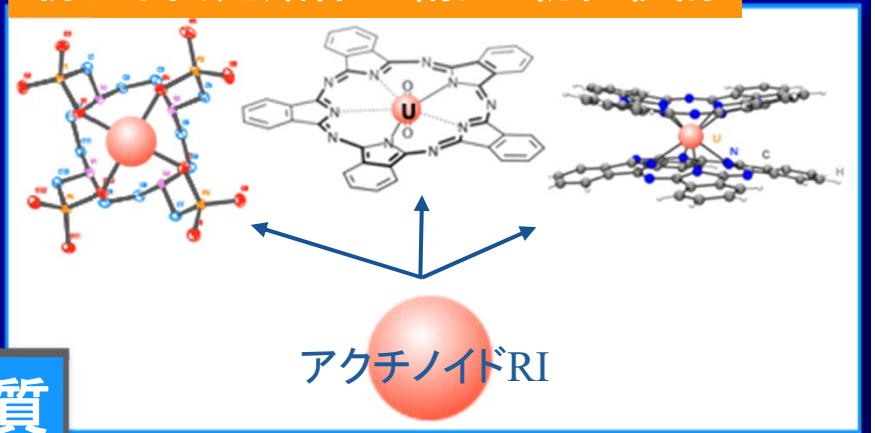
アクチノイド

創成

利用されるアクチノイド崩壊系列

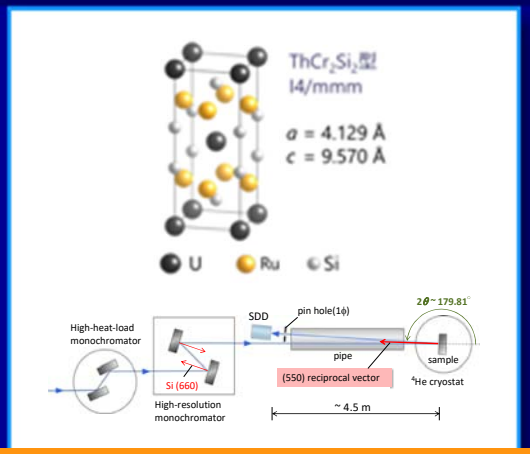


新たな安定錯体の創出・物性検討



核的性質

アクチノイドの興味深い性質を探り、活用し、安定化に寄与　2－2

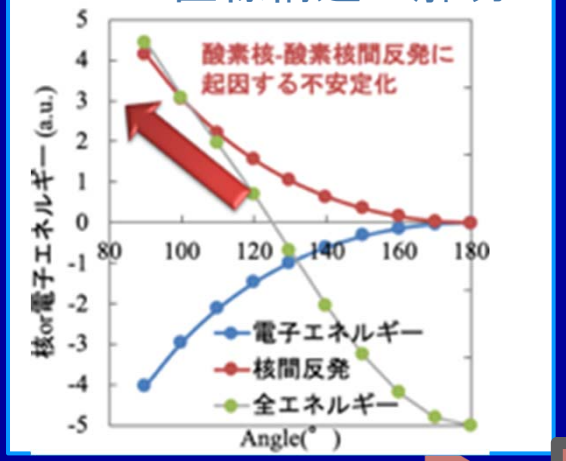


プローブ（放射光・NMR・中性子）利用研究

電子的性質

相対論的量子計算による研究支援

O=U=O直線構造の解明



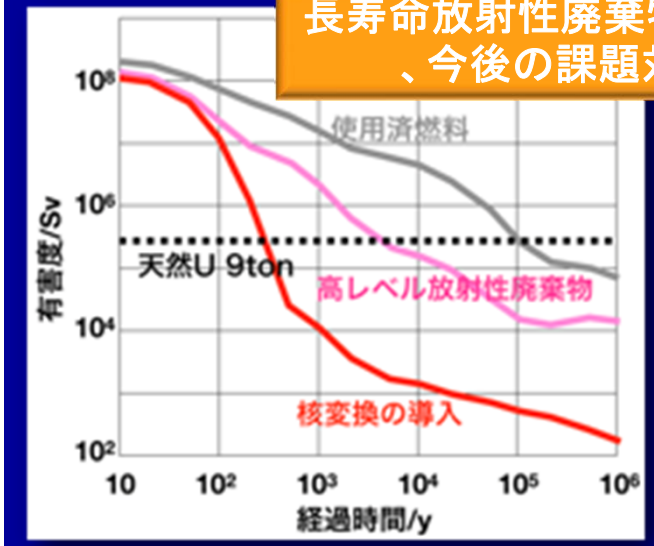
解析

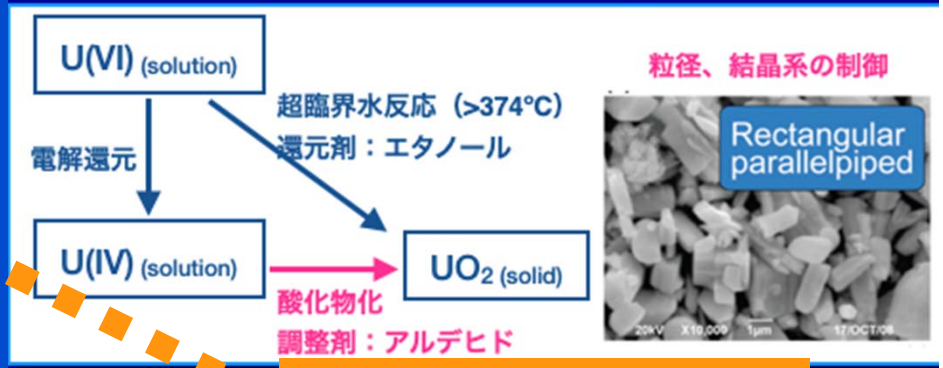
利用

アクチノイド

創成

長寿命放射性廃棄物・デブリ等、今後の課題対応へ

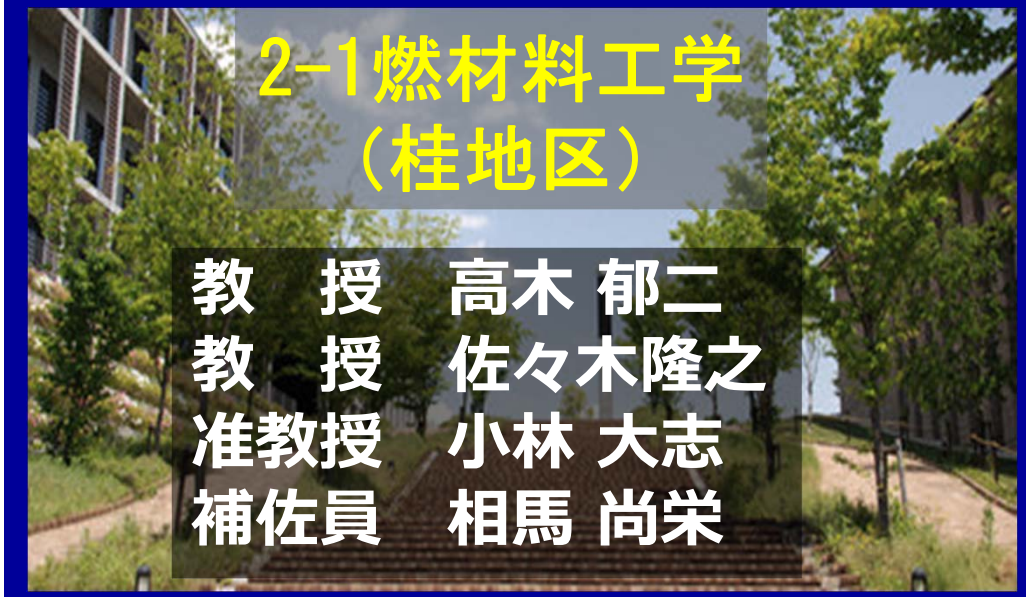




簡便かつ高度制御可能な酸化物調整法の開発

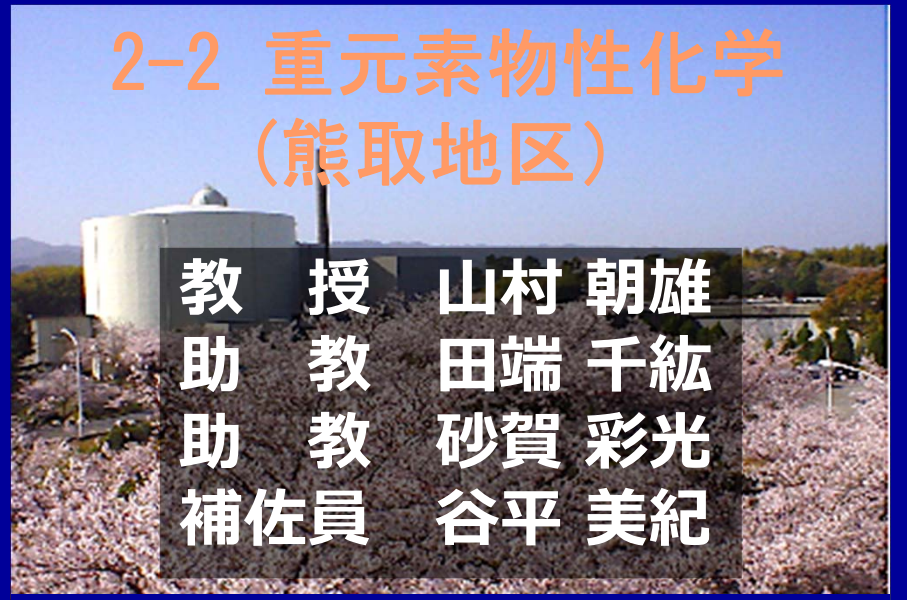
核的性質

メンバーと研究場所



2-1燃材料工学（桂地区）

教　授	高木 郁二
教　授	佐々木隆之
准教授	小林 大志
補佐員	相馬 尚栄



2-2 重元素物性化学（熊取地区）

教　授	山村 朝雄
助　教	田端 千紘
助　教	砂賀 彩光
補佐員	谷平 美紀

活動拠点：
- 桂C3棟（2-1）
- 複合原子力科学研究所（2-2）

実験施設：
- 桂　　C3棟実験室、RI実験施設
- 宇治　放射実験室（加速器，核燃料）
- 熊取　複合原子力科学研究所（RI，核燃料）
- 国内外（共同利用）

第２Ｇｒからのメッセージ

運　動

日　常

余　暇

・実験主体

・ＯＢとの交流が盛ん

（エネルギー，機械，　電気，IT，官公庁など）

・学力不問、興味が大事

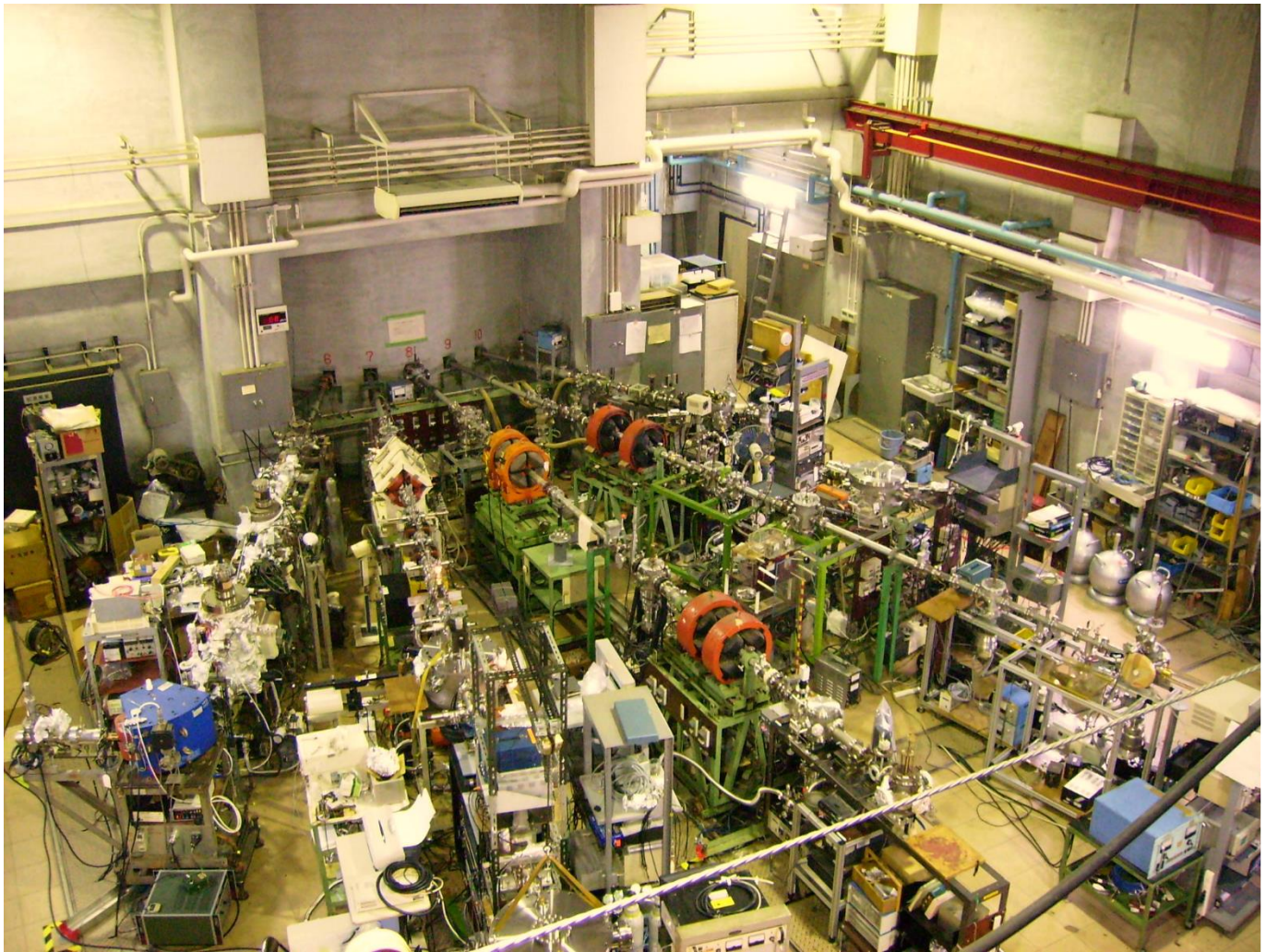
ＯＢ会

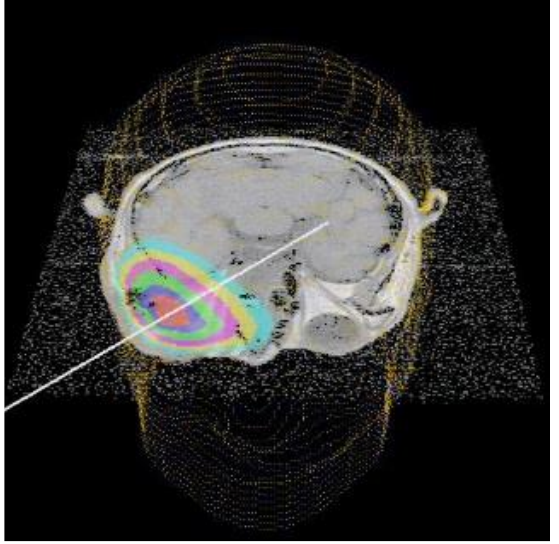
コンパ

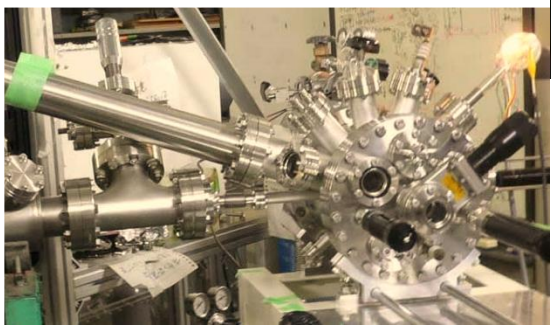
実　験

第３グループ

量子システム工学







第３グループ
量子システム工学

3-1　量子ビーム科学

3-2　粒子線医学物理学（熊取）

◆ 基礎研究

斉藤学，土田秀次，間嶋拓也，今井誠

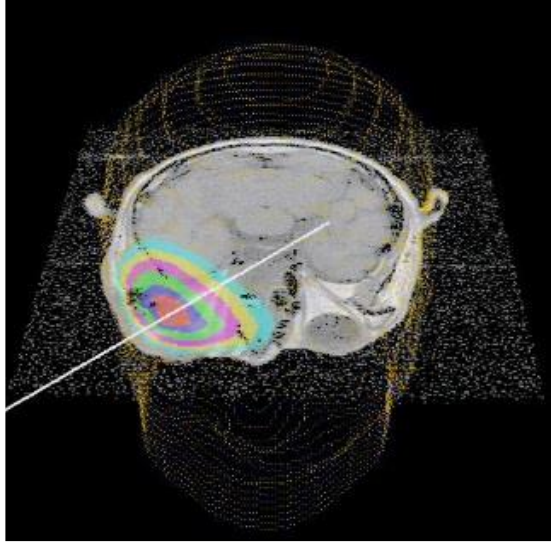
◆ 工学応用研究

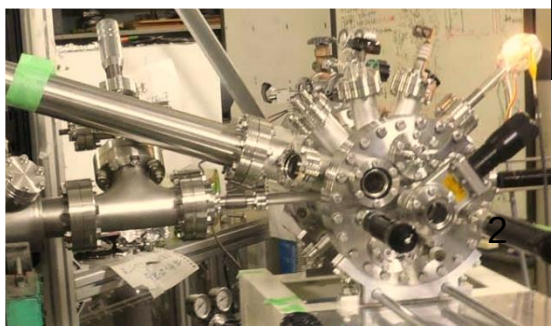
松尾二郎，瀬木利夫

◆ 医学物理学研究

櫻井良憲，田中浩基，高田卓志（複合原子力科学研究所）
溝脇尚志（医学研究科）

修士博士連携プログラムを実施
融合工学コース生命・医工融合分野先端医学量子物理領域

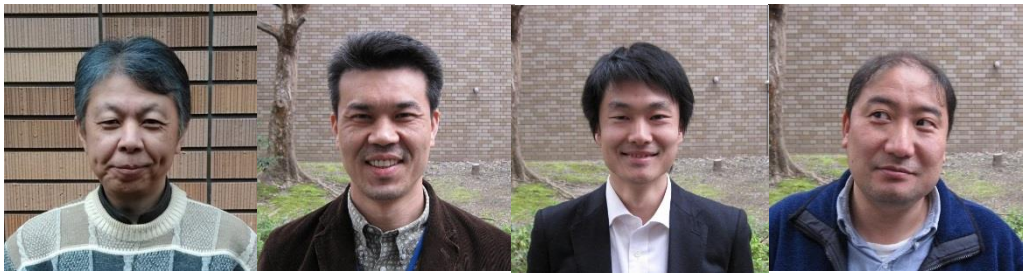




量子ビーム科学基礎研究メンバー

スタッフ

斉藤学　土田秀次　間嶋拓也　今井誠



D3：村瀬龍

M2：上野公希，佐藤隆哉，鈴木鴻介，柳口富一

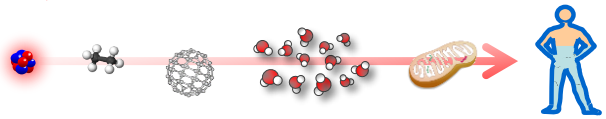
M1：小倉弓枝，中川創平，本郷瑞紀，水並優樹，山佐一樹

B4：5月配属予定

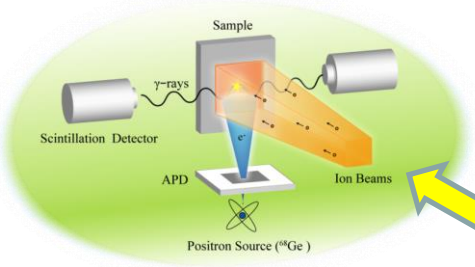
高速イオンビームを用いた原子分子レベルでの物理・工学

～ミクロな世界を探る“量子ビーム科学”～

連絡先
saito@nucleng.kyoto-u.ac.jp



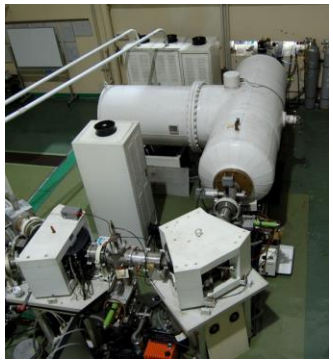
リアルタイム観察

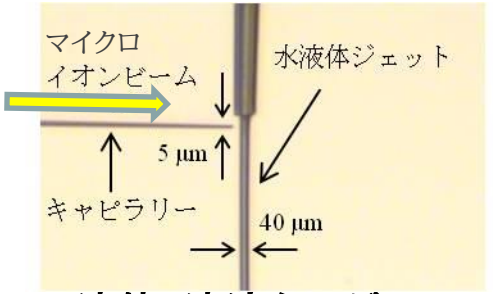


液体物質の照射効果研究

3台のイオン加速器を駆使して高速イオンビームを作り出す

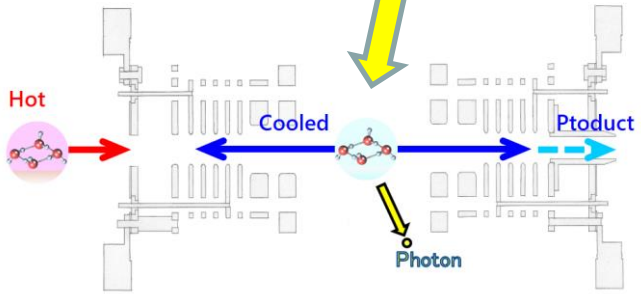
イオン照射極端環境下での物性解明





液体・液滴ターゲット先端技術

宇宙空間分子進化への放射線影響

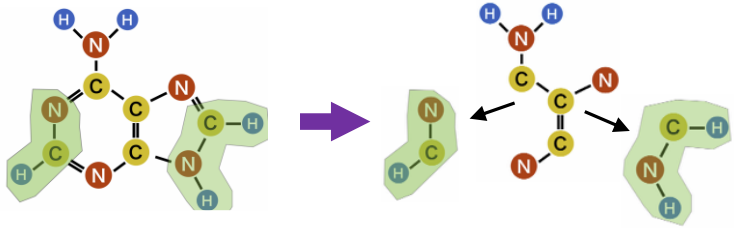


超高真空イオンビームトラップ技術

独自の技術とアイデアで原子空間の反応を解明！

http://www.nucleng.kyoto-u.ac.jp/Groups/Gr3/

放射線照射による生体分子の損傷研究



分子解離ダイナミクス

量子ビーム科学工学応用研究メンバー

スタッフ

松尾二郎　　瀬木利夫

D3：木原圭史（社会人）
M2：野々村知也
B4：5月配属予定

量子ビームによる革新的ナノプロセス・評価技術の開拓

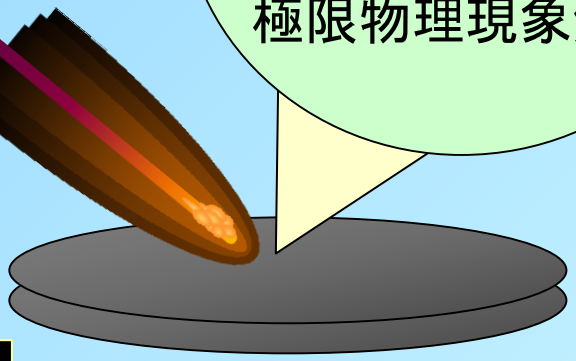
～独創的な量子ビームで未来を拓け～

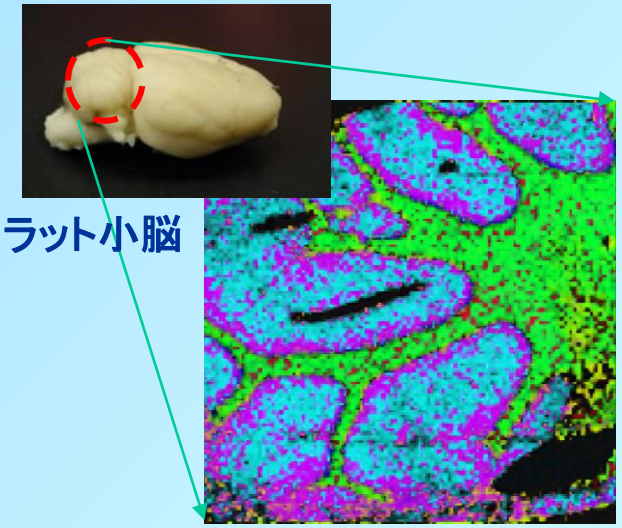
松尾班　教員：松尾准教授、瀬木講師

高速ナノ加工
高品位多層膜形成
高分解能SIMS分析
生体イメージング
極限物理現象解析

先端量子ビーム

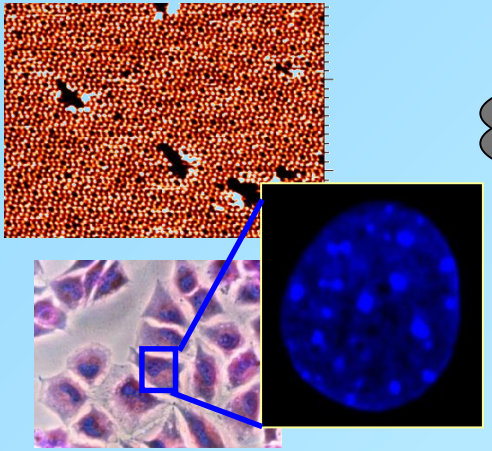
クラスターイオン
MeV重イオン



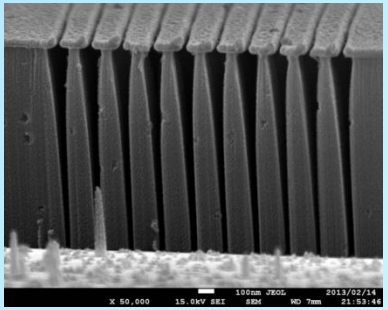


ラット小脳

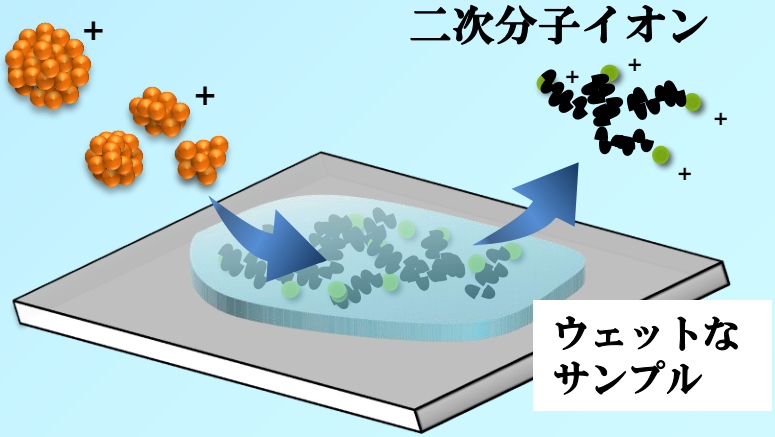
生体試料 質量イメージング分析



イオンが衝突した表面の
原子レベル・細胞レベル観察



Siの微細加工

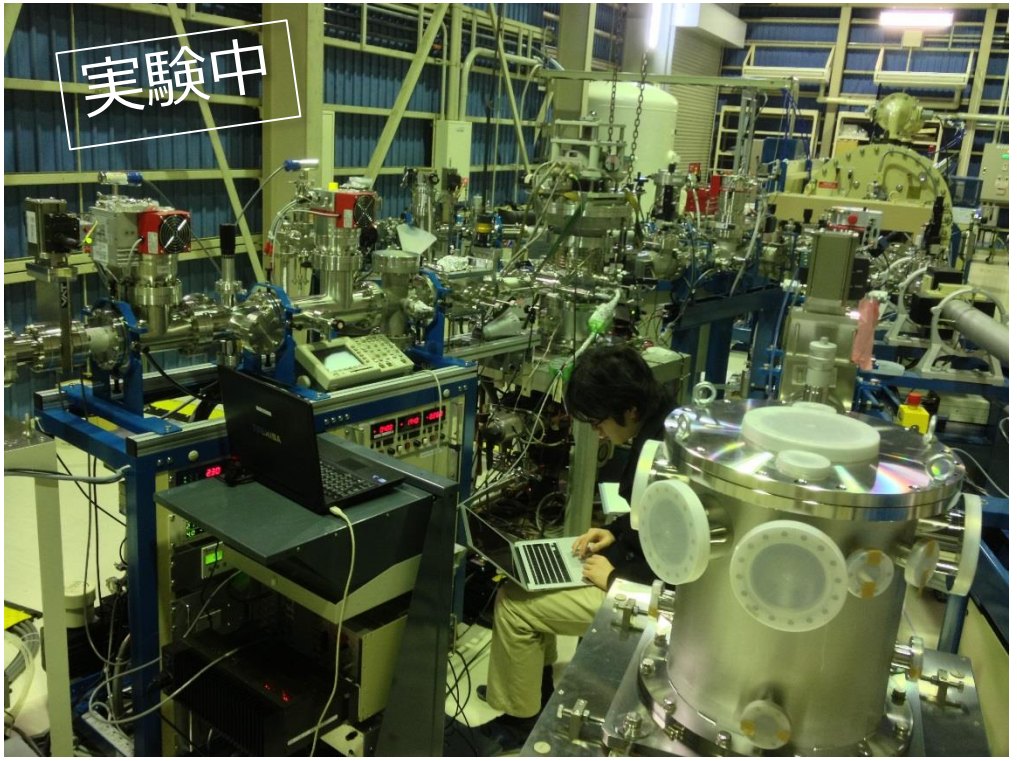


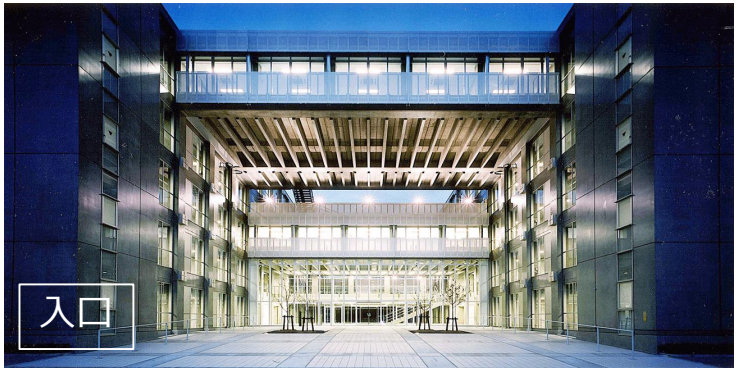
大気圧SIMS分析

活動場所（3-1）

- **桂キャンパス**
  - 授業（主にM1前期）
  - 研究会

- **宇治キャンパス**
  （放射実験室、総合研究実験棟）
  - 実験（マシンタイム）
  - 研究会
  - 飲み会





医学物理学研究メンバー

スタッフ（複合原子力科学研究所）

櫻井良憲　田中浩基　高田卓志

D3:岡崎啓太、D2:白石禎晶、D1:笹木彬礼
M2:柿本有貴、内藤鵬太、中村泰基、
松永ひかる、松林錦
M1:加藤寛明、成田亮介、野尻摩依

協力スタッフ（医学研究科）

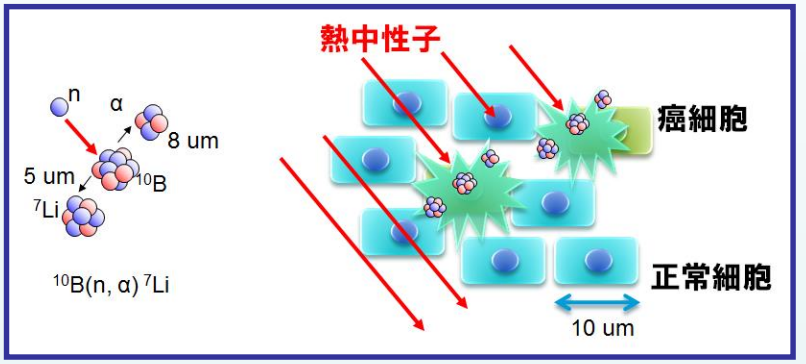
溝脇尚志　中村光宏

放射線腫瘍医
スタッフ：10名，医員：5名
大学院生(博士課程)：12名
医学物理グループ
スタッフ：6名
大学院生(博士)：4名，(修士)：3名

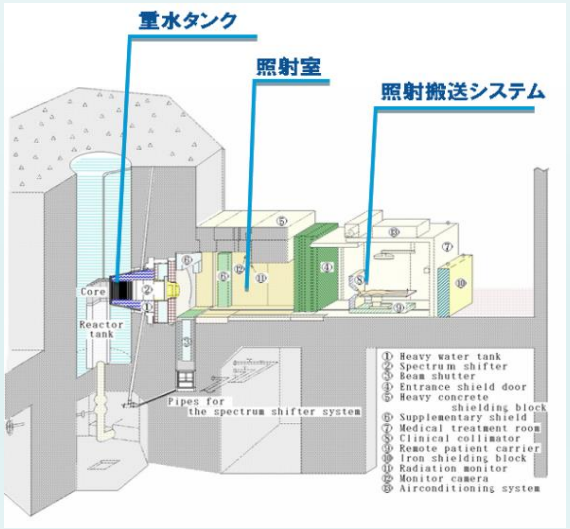
粒子線医学物理学研究分野

複合原子力科学研究所　櫻井良憲 准教授、田中浩基 准教授、高田卓志 助教

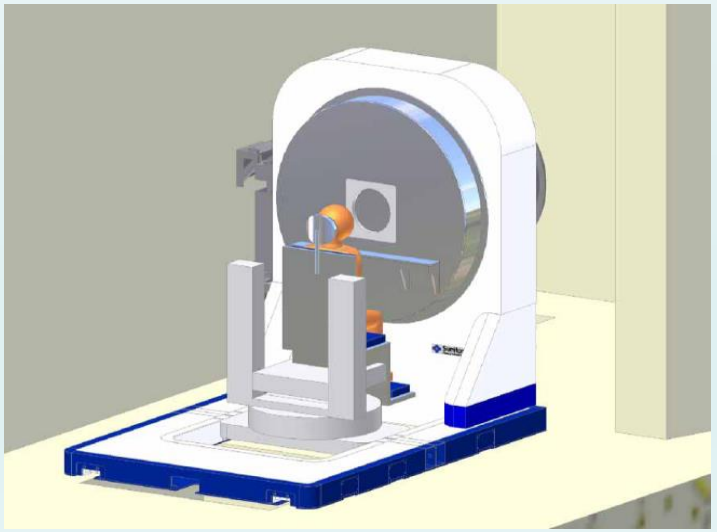
医学物理学とは、医療、特に、放射線医療・粒子線医療を支える物理および工学の総称である。その内容は多岐にわたるが、重要な使命は「**放射線治療法の高度化の促進**」と「**品質保証**」である。本研究分野では、粒子線治療法の一つである「**硼素中性子捕捉療法（BNCT）**」に重点を置いて、医学物理学および物理工学的課題について研究を行っている。



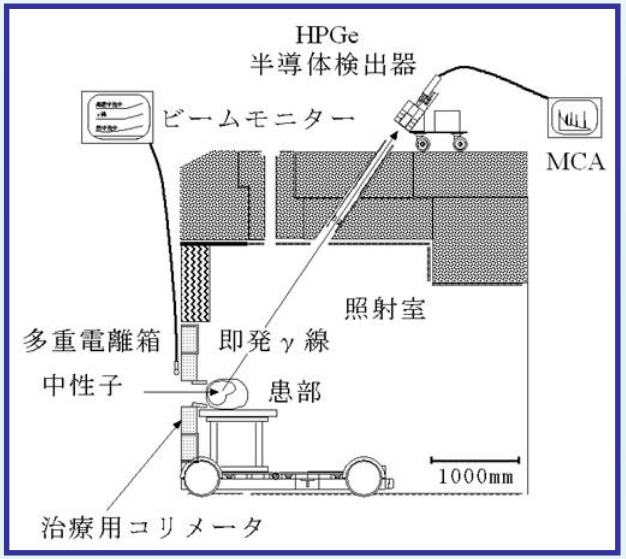
BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)
癌細胞破壊の選択性に優れている。



原子炉ベース照射場



サイクロトロンベース照射場

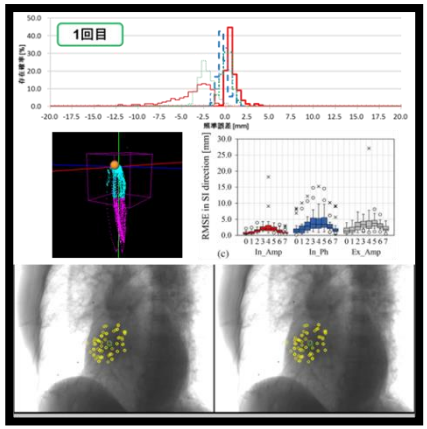


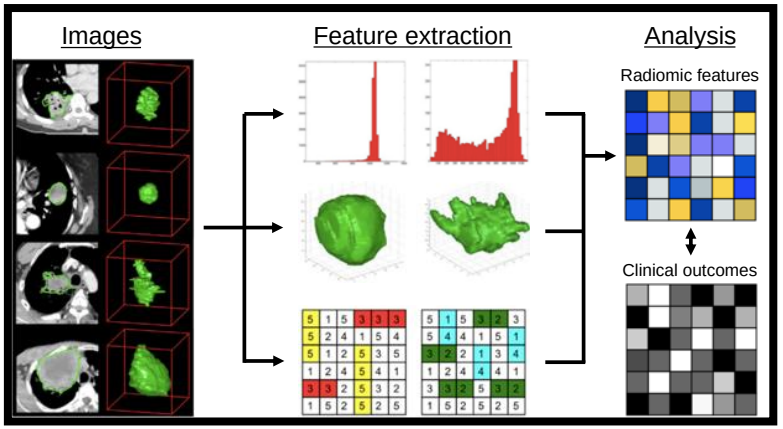
線量評価統合システム

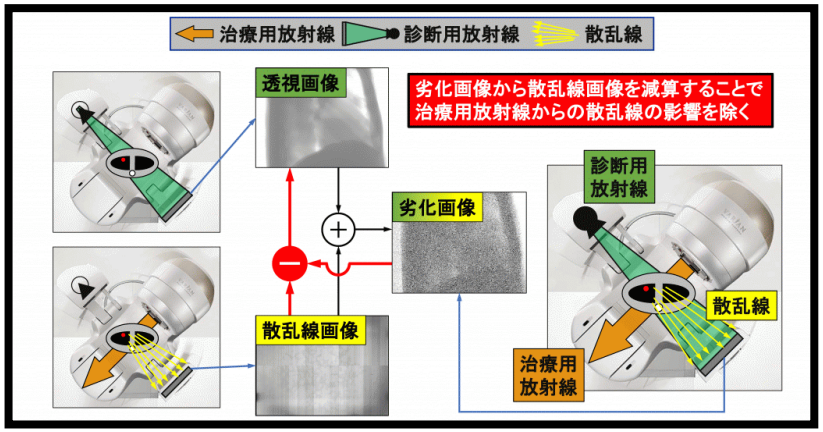
京大病院放射線治療科　医学物理グループ

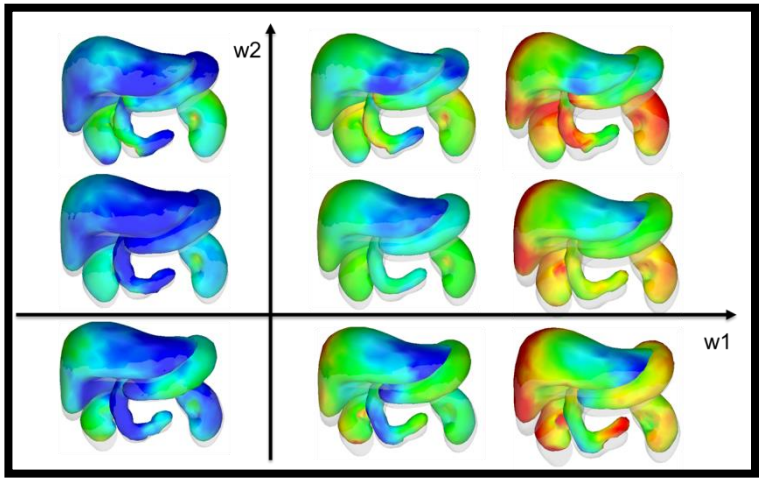
放射線によるがん治療の最前線で研究・臨床研修を行います

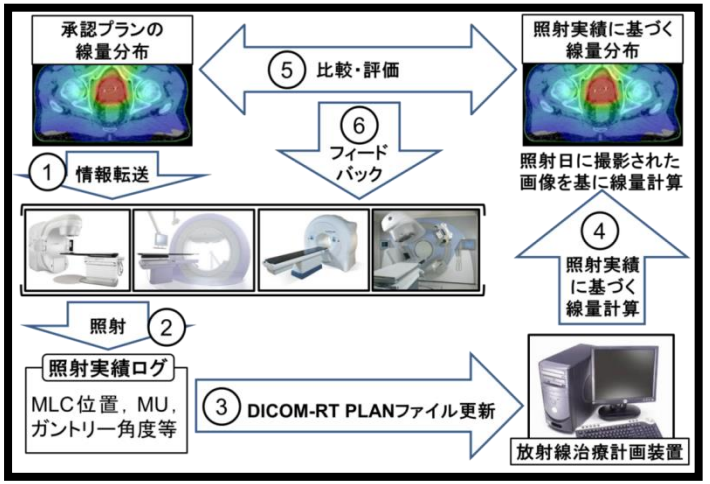
※工学研究科　融合工学コースに在籍しながら，研究活動は京大病院放射線治療科内で実施











患者データ，医療用直線加速器などを用いて，がんに対する放射線治療成績の向上に資する研究を展開

医療に対する興味と熱意のある人を歓迎します！

医学研究科　中村光宏　m_nkmr@kuhp.kyoto-u.ac.jp　http://medicalphysics.hs.med.kyoto-u.ac.jp/

進路先（ここ３年）

博士課程修了
北大（ポスドク）、日立製作所、住友重機械工業、大阪医科大学、原子燃料工業、イオンテクノセンター

修士課程修了
日立製作所，東京海上，JXTGエネルギー，進研アド，京進，発電設備技術検査協会，パナソニック、関西電力、東京電力、島津製作所、大和証券、永大化工、日立ハイテク

第3グループに対するメール問い合わせ：

saito@nucleng.kyoto-u.ac.jp

第4グループ 量子物質工学

４－１　量子物理学

４－２　中性子工学
X線CT、低速中性子物理

桂
キャンパス

４－３　中性子源工学
（原子炉安全、加速器）

４－４　中性子応用光学

複合原子力
科学研究所
（大阪府熊取町）

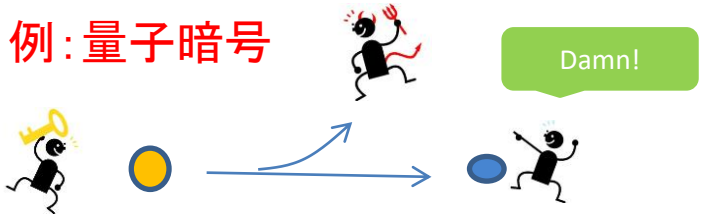
4-1: 量子物理学研究室

理論の研究室です

●量子情報理論

量子論を用いるとどのような
情報処理ができるか

例：量子暗号



量子状態はコピーできない！

不確定性関係の
情報理論的定式化
(Miyadera, Imai, 2006)

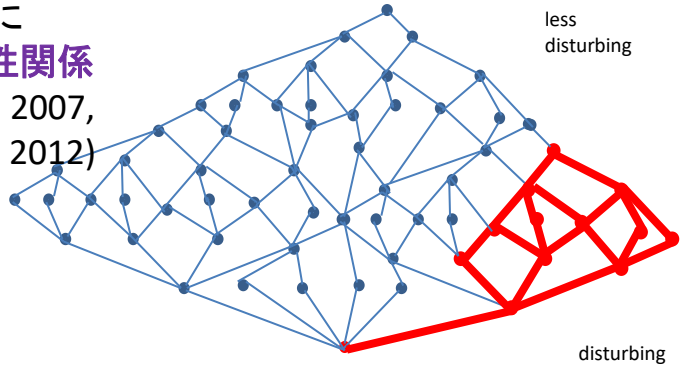
量子測定
量子情報
　　量子暗号
　　量子計算
量子アルゴリズム的情報理論
量子論理
量子カオス
量子非平衡状態
量子多体系のデコヒーレンス
量子論における自発的対称性の破れ
量子ダイナミカルエントロピー
量子化学における制御
量子細線（メゾスコピック系）
量子マルコフ鎖
・・・

ほかにも

●量子測定理論

どんな物理量が同時測定できるのか

一般的物理量に
対する**不確定性関係**
(Miyadera, Imai 2007,
2008, Miyadera 2012)



物理量Aを測定するチャネルの順序構造
（Heinosaari, Miyadera 2013)

量子性・量子効果

古典的対応物がないもの
古典的描像では説明できないもの

修士論文の例

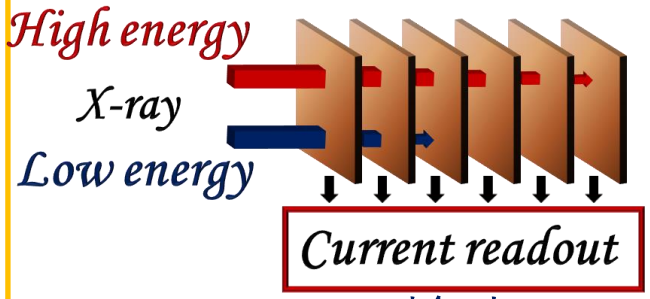
- **超対称性をもつフェルミオン系について**
- **量子論における合成系の構造**
- **量子非平衡定常状態における熱力学第二法則・・**

お問い合わせはお気軽に宮寺・小暮へ
miyadera@nucleng.kyoto-u.ac.jp　ogure@nucleng.kyoto-u.ac.jp

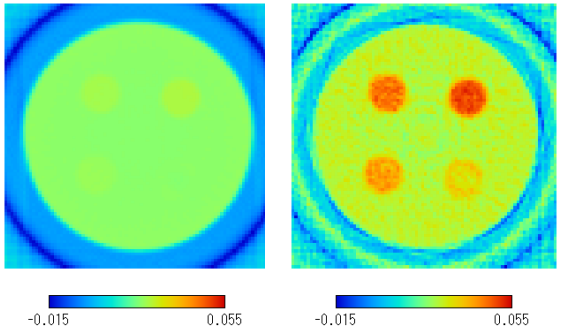
4-2 中性子工学・(放射線検出器, X線)

エネルギー分解X線CT

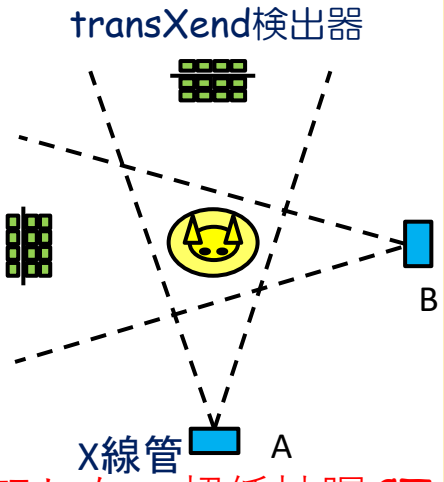
第一世代CT



transXend検出器

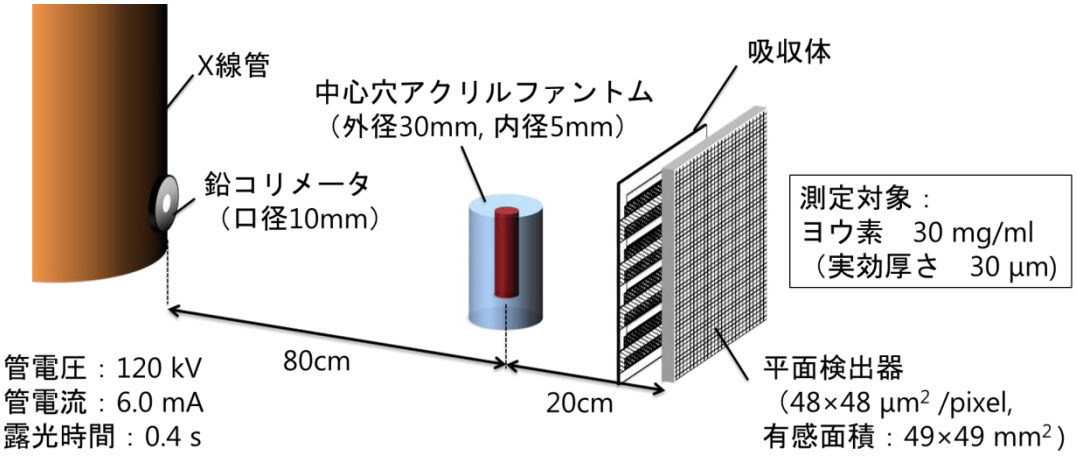


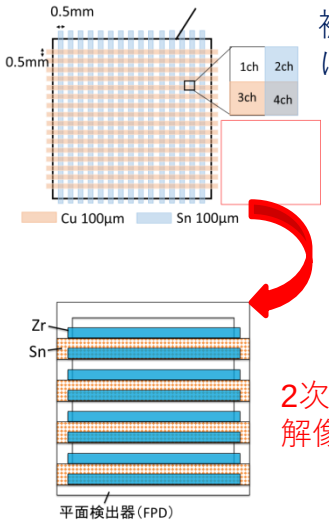
電流測定CT　エネルギー分解CT



低被曝CT　実効原子番号測定　回転しない超低被曝CT

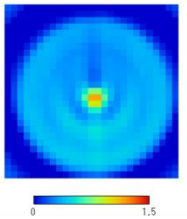
第三世代CT





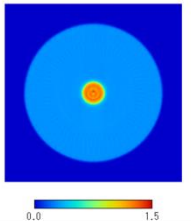
被検体を一挙に撮影

画像は荒い



格子状平面transXend検出器

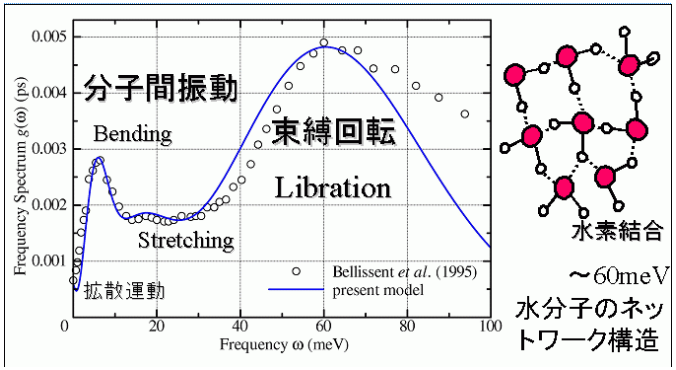
2次元検出器の解像度を利用



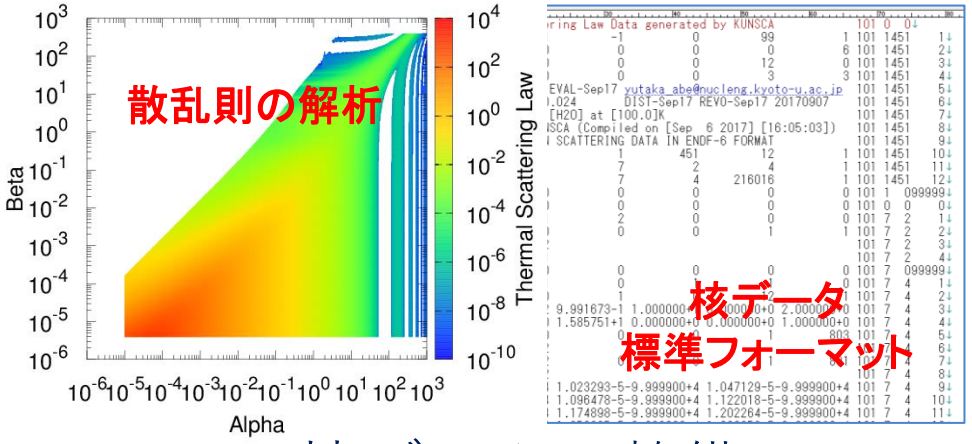
ストライプ状平面transXend検出器

4-2 中性子工学研究室（中性子）

低速中性子の発生

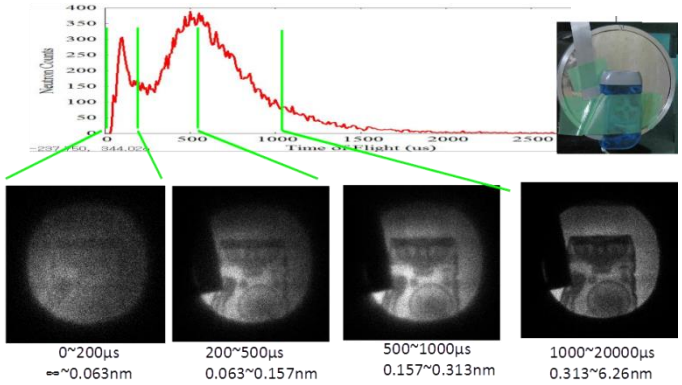


減速材の散乱断面積の解析

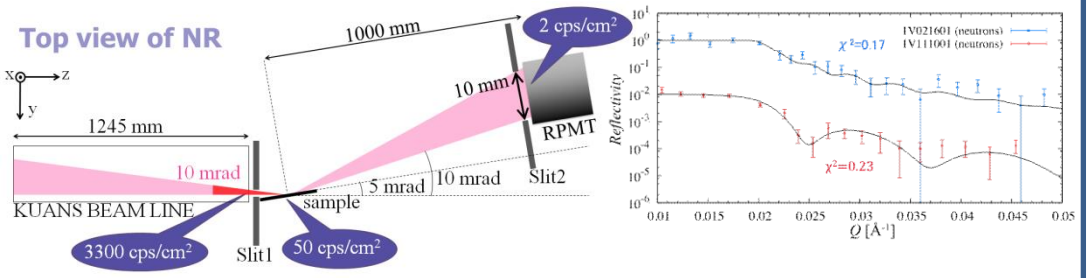


核データの整備

低速中性子利用



中性子透過像撮影（非破壊検査）



中性子による物性測定
（表面での物質構造）

（4－3: 原子炉安全）

- 原子核工学専攻　中性子源工学分野

- 複合原子力科学研究所（＠熊取町）
- 原子力基礎科学研究本部･原子力基礎工学研究部門
- 研究炉安全管理工学研究分野

教　授：中島　健（原子炉物理、臨界安全）
准教授：山本俊弘（原子炉物理、臨界安全）
　　堀　順一（核データ測定・評価）
助　教：沈　秀中（熱水力・気液二相流実験）
　　寺田和司（核データ測定・評価）

核データから原子炉実験、原子力施設の安全性評価まで広範囲な研究を実施

～　ミクロからマクロまで　～

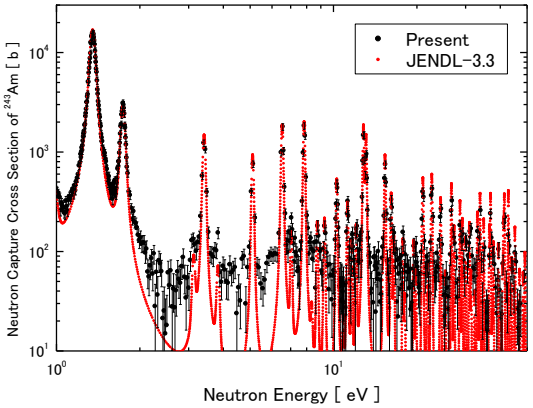
ミクロ：基礎データの取得・評価

電子線型加速器

$R(E)=\sigma(E)\phi(E)$

加速器を用いた
核データの測定

新たな核データ
の提供



^{243}Amの中性子捕獲断面積

我が国の標準
核データライブ
ラリ（JENDL)へ
のデータ提供

マクロ：原子炉等への応用

研究用原子炉KUR

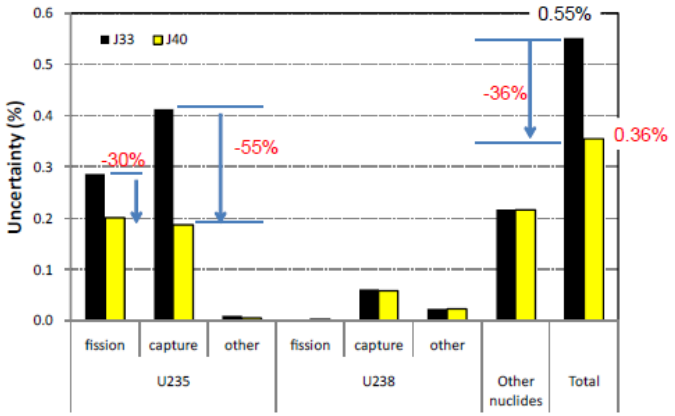
日本の大学が所有している唯一の出力炉

核データへの
フィードバック

$R=\int\sigma(E)\phi(E)dE$

原子炉を用いた
核特性の測定

核設計手法の検証
原子炉安全性の評価



例：炉心核特性の不確かさを評価

ビーム物理研究室（協力講座：4-3）

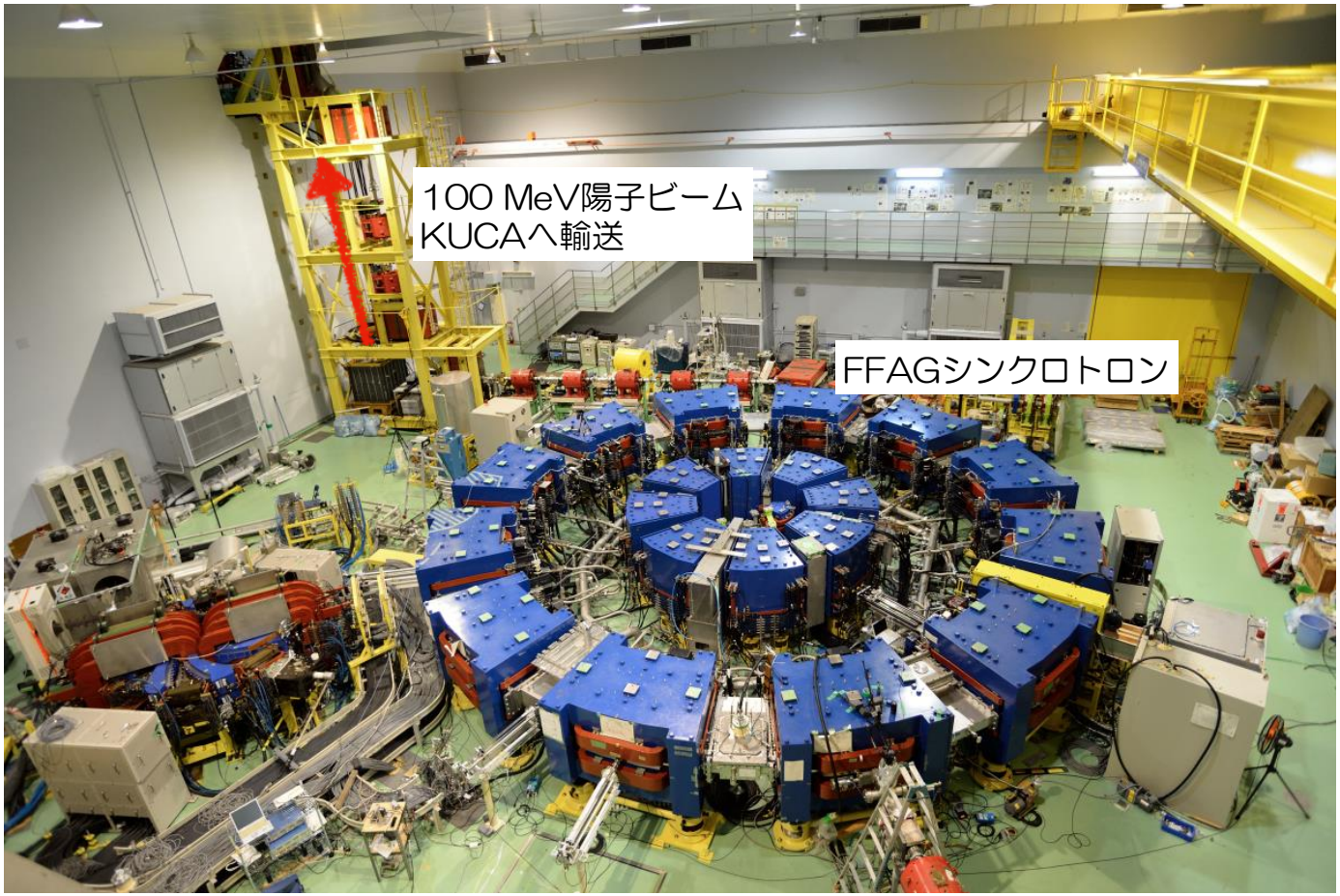
複合原子力科学研究所
安全原子力システム研究センター
加速器応用工学研究分野

准教授　：石 禎浩
助教　：上杉智教
助教　：栗山靖敏
特任教授：森 義治

主な研究テーマ（その1）

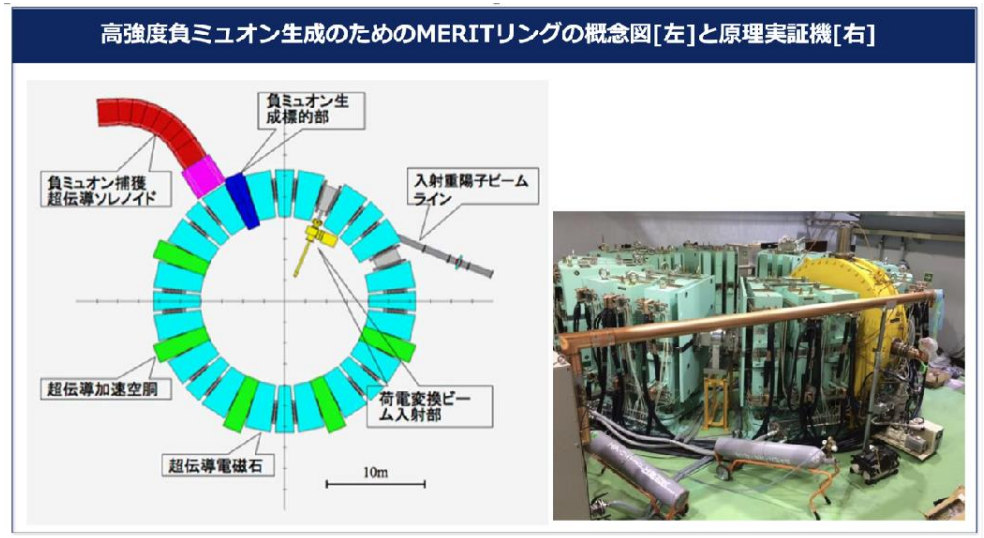
1. 加速器駆動システム（ADS:Accelerator Driven System)

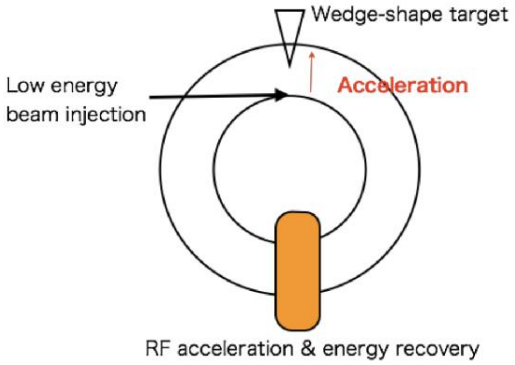
加速器からのビームが生成する中性子をタネとして駆動する未臨界システム
長寿命核種を短寿命核種に変換可能
FFAGシンクロトロンとKUCAによる世界で唯一のADS実験施設



主な研究テーマ（その２）

2. 高強度ミュオン生成リングの基礎研究





内部ターゲットでパイオンを生成
パイオン（崩壊）→ミュオン

ミュオン利用：
1. ミュオン核変換による放射能除去　$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu$
2. ミュオン触媒核融合

京大ウェブサイトより

高レベル放射性廃棄物低減・資源化の鍵、新たなミュー粒子生成法へ向け原理実証

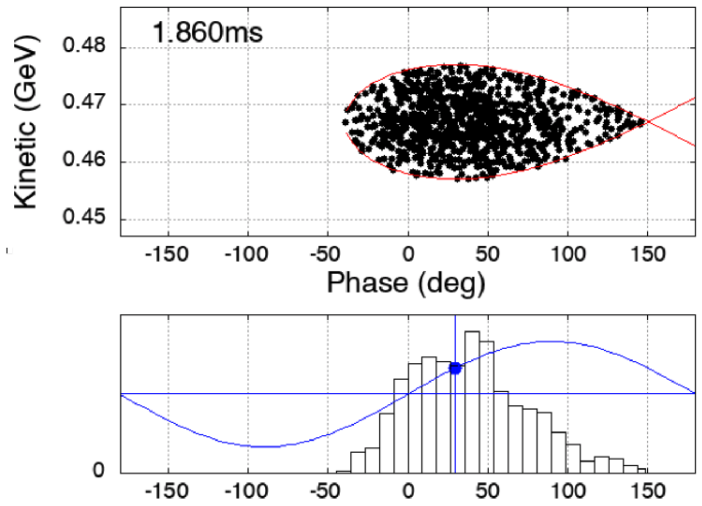
2017年12月14日

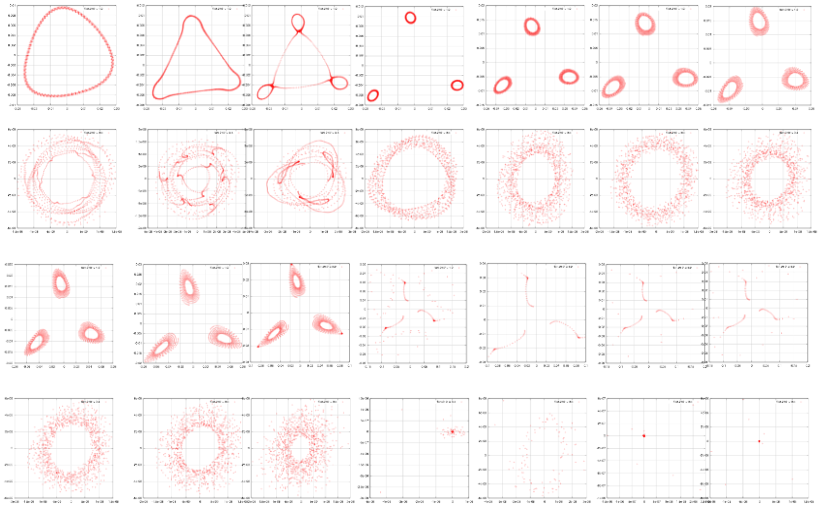
森義治 原子炉実験所特任教授、石禎浩 同准教授らの研究グループは、半減期の長い核種を変換処理するために用いる負の電荷をもつミュー粒子（ミュオン）の生成方式を新たに考案し、その根幹を担うビーム加速の原理実証に成功しました。

主な研究テーマ（その３）

3. ビーム物理学の基礎研究

コンピューターシミュレーションと実際に稼働中の加速器（FFAGシンクロトロンとMERITリング）を用いたビームスタディーによる、非線形ビーム動力学およびビームの集団的扱いに関する研究





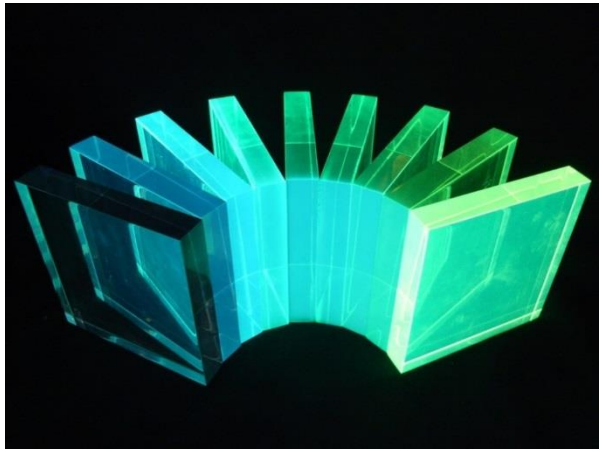
中性子応用光学分野(4-4)

中性子光学の広域展開

基礎物理から応用物理・工学・農学まで

中性子利用は原子炉だけでなく、どんどん広がっています！

共同研究すると共に、低速中性子の物質「波」としての特徴を利用した世界最高レベルの中性子光学素子を活かし、J-PARC MLFの分光器(VIN ROSE)開発から、放射線検出器まで広く開発研究を展開しています。



中性子応用光学分野(4-4)

中性子光学の広域展開

基礎物理から応用物理・工学・農学まで

VIN ROSEの名前の通り、中性子とワインの本場、フランスのグルノーブルの研究用原子炉ILLとも親交深く、共同実験もしています。

2014年にVIN ROSEで初ビーム取得時の主要メンバー

連絡先・見学

http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/neutron/optics/

原子核工学専攻、複合原子力科学研究所ホームページからもリンク有り

研究室訪問
随時可能

田崎准教授に
相談してくれても
連絡できます。

京都大学
複合原子力科学研究所
Institute for
Integrated Radiation and Nuclear Science
Kyoto University

日野
hino@rri.kyoto-u.ac.jp

小田
t_oda@rri.kyoto-u.ac.jp

中村
hidehito@rri.kyoto-u.ac.jp