



東北大學 金属材料研究所 附属量子エネルギー材料科学 国際研究センター



大洗センター案内

International Research Center for Nuclear Materials Science
Institute for Materials Research (IMR)
Tohoku University



量子エネルギー材料科学国際研究センター

東北大学金属材料研究所附属量子エネルギー材料科学国際研究センター（以下では当センターと呼ぶ）は、平成16年4月1日にその前身である材料試験炉利用施設（昭和44年設置）を名称変更して発足したものです。当センターでは以下のように旧施設が行ってきた全国共同利用等の主要な業務を引き継ぐとともに、人材の育成、学術的研究の推進に重点を置きつつ、国際化をはじめとして新たな展開を図っていくことにしています。

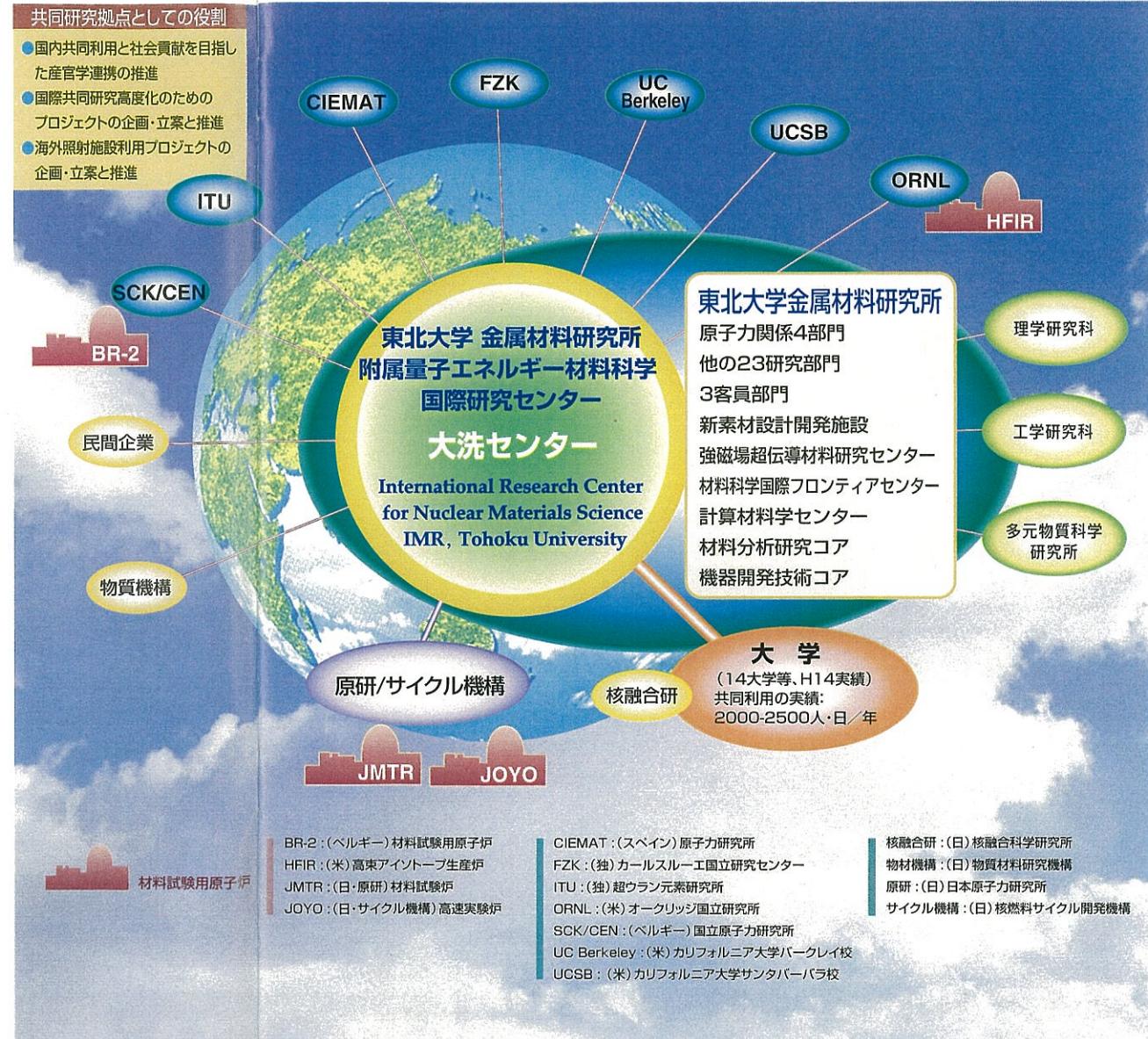
原子力は我が国の発電量の30%以上を担う主要なエネルギー源であり、国内で稼働している原子炉の数も50基を越しています。これらの原子炉を安全に、かつ人々が安心感を持てるように運用していくためには、原子力材料の寿命評価等の安全に関わる研究が不可欠です。当センターでは東北大学金属材料研究所の持つ最先端の材料科学的手法を駆使してこのような材料研究を行っています。また、将来の核融合炉等のエネルギー源のための材料に関する研究も重要な研究対象です。さらに、原子炉を使用する際に発生する使用済み核燃料の安全な処理・処分に関する研究、アクチノイド元素や劣化ウラン等を積極的に利用した新物質の創製、およびこれらの基礎となる物性的研究は、材料研究に並ぶ当センターの研究の柱です。当センターではこのような研究を自ら行うとともに、全国の大学や研究機関の研究者を対象に、全国共同利用機関として共同利用を支援するとともに、積極的な共同研究を推進しています。

人材の育成は原子力の将来にとって重要な課題です。当センターはこれまで大学院生の学位取得のための研究や夏期集中学生実習を通して人材育成に大きな役割を果たしてきましたが、今後も客員教員制度の充実等を通して教育・訓練を推進していく計画です。

高い研究水準を維持し、情報や研究技術を共有することにより研究の効率化を図る上で国際化は極めて重要です。当センターは世界の代表的な研究機関と研究協定を結ぶなどして、人材の交流、試料等の交換、情報の交換を図っていくことにしています。原子力研究の上で照射施設は特に重要ですが、現在利用している日本原子力研究所の材料試験炉や核燃料サイクル開発機構の常陽に加え、今後はさらに海外の原子炉等を利用した照射試験を進めていくことにしています。右の図には今後のセンターと関係機関との協力体制を模式的に示しました。

大学等が進める材料照射研究に関する国際協力の国内拠点としての役割もセンターの重要な機能です。日米科学技術協力・核融合分野での事業であるJupiter-II計画においても、当センターは重要な役割を担ってきましたが、今後はさらに広範な国際協力等において主体的な役割を果たしていく計画です。

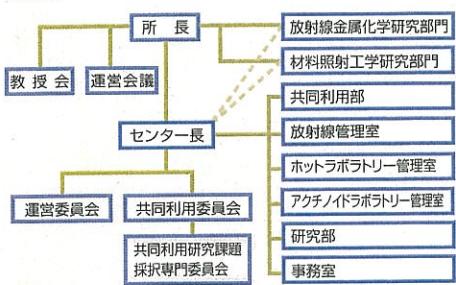
これらの業務を進めていく上で、日本原子力研究所や核燃料サイクル開発機構との緊密な連携・協力は欠かせません。客員制度等を整備しつつ有機的な協力関係をさらに強化していくことが重要です。また、産官学の連携事業の推進や地元との協力により、研究の社会還元を図っていくことにしています。



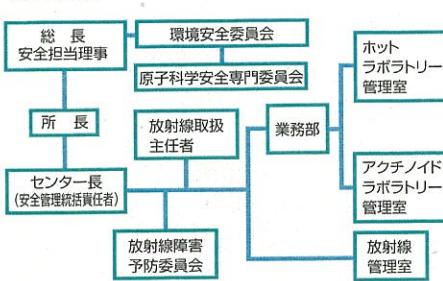
運営組織と放射線安全管理

当センターの運営組織は共同利用部、放射線管理室、ホットラボラトリー管理室、アクチノイドラボラトリー管理室、研究部および事務室から構成されている。また、当センターの放射線安全管理組織は東北大の「原子科学安全専門委員会」、金属材料研究所長のもと、センター長（安全管理総括責任者）、放射線管理室、業務部（ホットラボラトリー管理室およびアクチノイドラボラトリー管理室を含む）により構成されている。運営に関して「放射線障害予防委員会」が放射線障害予防規定に基づき設置されており、放射線障害予防の観点からの報告と審議を毎週行い、必要に応じて適切に対応できる態勢を整えている。

組織図

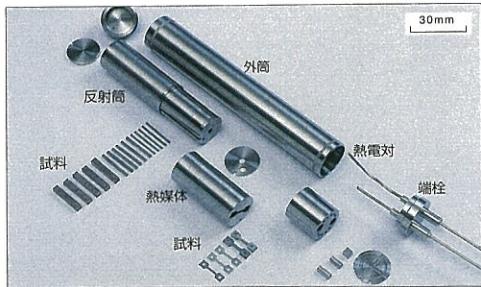
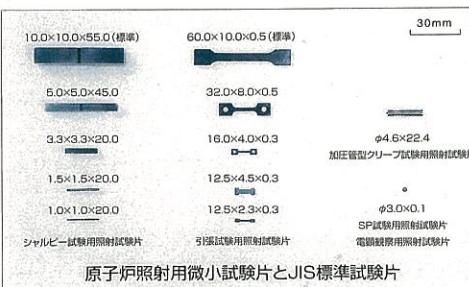


安全管理図



原子炉照射試験

国内外の原子炉を用いて中性子照射試験を行う。中性子照射に用いる試料は、限られた照射スペースを最大限に活用するために、また照射時の温度・中性子束の勾配を低減するために、標準サイズの寸法よりも著しく小さいことが要求される。これらの試料（微小試験片）は照射用のキャップセルの中に装荷されるが、キャップセルは共同利用研究者の希望する種々の照射条件を満足するように設計される。写真は、機械的特性評価のために使用される照射用試料、およびJMTR照射で使用されているキャップセルのインナーカラッドと試料（一部）を示す。



センターにおける照射後試料の流れ

JMTRやJOYO、および海外の原子炉で照射された試料は、キャップセルに装荷された状態で大型輸送容器に入れられ、専用トラックで当センター内ホットラボラトリー棟（H棟）に搬入される（写真①）。大型輸送容器はクレーンで移動され（写真②）、鉛セル内に搬入されたキャップセルは遠隔操作切断により解体され（写真③）、照射済みの試料が注意深く取り出される。それらの放射性試料は、共同利用研究者ごとに分類（区分け）され、H棟内の鉛セル・貯蔵室内に保管される。その後、研究の目的に応じ、H棟（写真④）、研究棟（K棟）（写真⑤）・セラミックス棟（C棟）、アクチノイド元素実験棟（A棟）（写真⑥）に移され、また一部は他大学に輸送されて照射後試験に供される。写真⑦に各棟の配置を示す。一方、解体作業等で発生した全ての放射性廃棄物は原研大洗研究所に委託廃棄処理される。



照射後試験技術

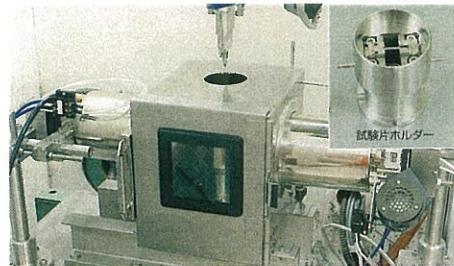
中性子照射等による材料の特性変化を調べるために、照射された材料について種々の照射後試験が必要である。当センターでは、照射後試験に関する共同利用研究者の種々の要求に応えるために、以下のように微小試験片技術をはじめとする新しい照射後試験技術の開発を行っている。

1. 材料の照射脆化評価のための種々の試験片サイズを用いた計装化シャルピー衝撃試験技術、およびロボットによるシャルピー試験片取付技術
2. 微小試験片を用いた機械的特性評価技術（引張試験、疲労試験、応力腐食割れ試験、3点曲げによる破壊非性試験）
3. 旋盤型装置によるセル内精密切断技術、およびロボットによる微小試験片仕分け技術

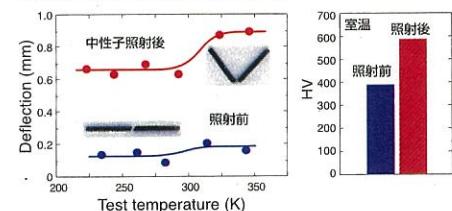
ホットラボラトリ一棟（H棟）

照射済みキャップセルからの放射性試料の取り出しと区分け、その貯蔵・保管とともに、放射能レベルの高い試料について、表面研磨（湿式、乾式）、微細加工（放電加工）、真空焼純、種々の機械的性質の測定（シャルピー衝撃試験、引張試験、曲げ試験、疲労試験、応力腐食割れ試験、クリープ試験、ビックアース微小硬さ試験、ナノインデンテーション）、および走査型電子顕微鏡による元素分析・破面の観察を行う。

計装化シャルピー衝撃試験機



標準サイズから世界で最も微小な寸法（ $1 \times 1 \times 20\text{mm}$ ）のシャルピー試験片について延性・脆性遷移温度の評価を行う（試験温度：77～1000K）。この試験機を用いて、高速中性子照射による脆化とは逆の、照射により延性が格段に向上する「照射誘起延性向上」の現象が微細結晶粒・粒子分散組織をもつ試作Mo合金で見出された（下図）。



走査型電子顕微鏡(SEM)



2次電子像および後方散乱電子像観察のほかに、特性X線元素分析(EDS)也可能である。

開発された多様な耐照射性光ファイバーを通して白色光（原子炉照射下での測定例）

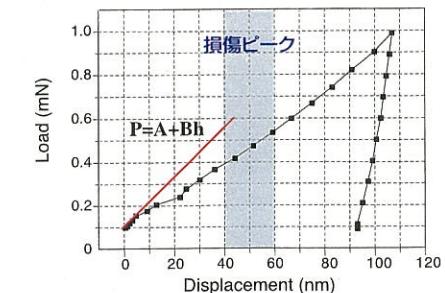


JMTR炉心で光ファイバに照射しながら、その光吸収特性を評価した例。すべての光ファイバは可視領域で光を通している。一部のものは選択吸収により白色光が着色する。

ナノインデンター



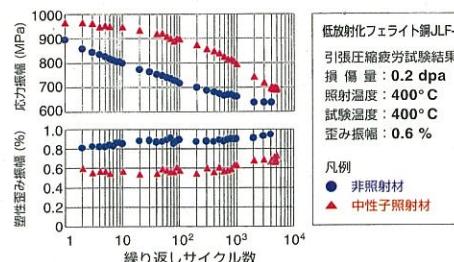
バーコピッチ圧子を超微小荷重、微小変位領域で押し込むことにより表面近傍の硬さを計測する。下図はHeイオン照射（ $2 \times 10^{17}/\text{cm}^2$, RT）された鋼の荷重変位曲線である。数MeVのイオン照射による損傷領域は試料表面近傍に限られるためイオン照射後の材料の機械的性質は微小変位領域で評価する必要がある。また、中性子照射材についても析出物や結晶粒界近傍での硬さを高精度に計測することが可能である。



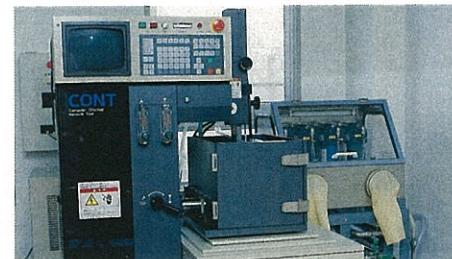
微小試験片用疲労試験機



真空および不活性ガス雰囲気で照射後疲労特性を評価する。荷重、軸変位および径ひずみによる制御が可能で、任意の加振波形を選択できる。本装置ではレーザー変位計による非接触のひずみ計測方式を採用し、砂時計型試験片の最小直径変化を $\pm 1\mu\text{m}$ の分解能で計測することが可能である。下図は、JLF-1の疲労特性に及ぼす中性子照射の効果を示す。

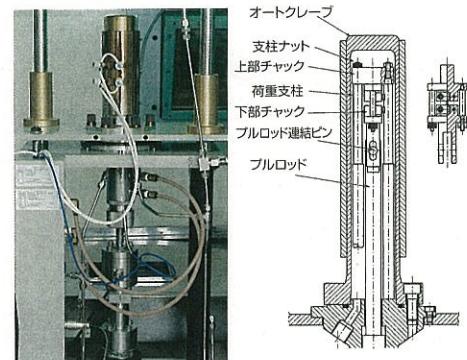


放電加工機

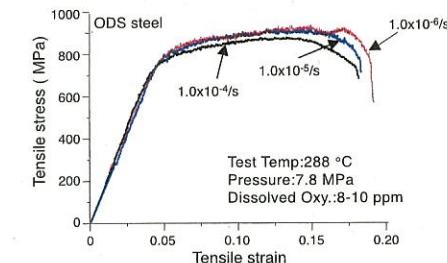


じんあい飛散防止用ループをもつRI専用のグローブボックス（写真右）が付いており、写真中央の水槽内にセットした原子炉照射済みの材料（金属、グラファイト、炭化物等）を各種照射後試験のために高精度に加工する。

低歪速度型応力腐食割れ試験装置



原子力材料や核融合炉材料の応力腐食割れ(SCC)機構を阐明するために高温高圧水（ $\leq 300^\circ\text{C}$, $\leq 10\text{ MPa}$ ）中において微小試験片による低歪速度の引張試験を行う。下図は高温高圧水中での3種類の低歪速度に対する応力-歪曲線で、ODSフェライト鋼の優れた耐SCC感受性を示す。



共同利用研究者控え室



測定データの解析や議論の場として、また研究者相互のコミュニケーションや休憩の場として自由に使用されている。A棟にも同様な控え室がある。

研究棟 (K棟)・セラミックス棟 (C棟)

H棟で区分けされた放射能の比較的低い試料について、照射により導入された種々の微細な欠陥の観察と元素分析を行う。このために、透過型電子顕微鏡、陽電子消滅同時計数ドッplerー広がりおよび陽電子寿命測定装置、低速陽電子ビーム発生装置、3次元アトムプローブ測定装置、電子スピン共鳴測定装置等、また試料作製のための電解研磨装置や集束イオンビーム装置等が設置されている。また、隣接するセラミックス棟には、陽電子消滅2光子2次元角相関測定装置、照射試料ID刻印用レーザーマーキング装置、試料作製用切断機(ダイヤモンドワイヤーソー等)、高速自動研磨機、耐照射性に優れた金属材料を開発・評価するための種々の装置がある。

透過型電子顕微鏡 (TEM)



加速電圧200kV、400kVの2台が設置され、放射化した試料の内部組織観察を行なう。高分解能観察、EDS分析、高温引張その場観察等も可能である。図は低温で中性子照射されたバナジウム合金の損傷組織である。照射欠陥集合体が転位運動によって掃過された転位チャンネルが観察される。

原子炉圧力容器鋼の照射脆化機構の解明

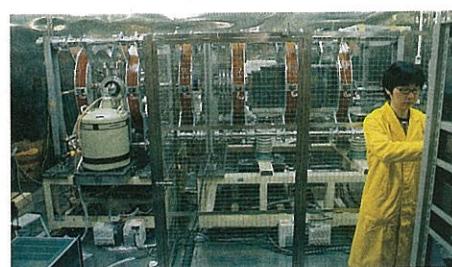
(b) V-Cu_x
原子炉圧力容器鋼の照射脆化の主因は、中性子照射による不純物銅の析出であると考えられている。そのモデル合金である鉄-銅合金中では、中性子照射によって内表面が銅で覆われたナノパイド(a)および空孔(b)が生成すること、それらは照射後焼鈍で、欠陥を含まない超微小銅析出物(c)になり、より高温(～650°C)まで残存することを、陽電子消滅測定によって見出した。

陽電子消滅同時計数ドッplerー広がりおよび陽電子寿命測定装置



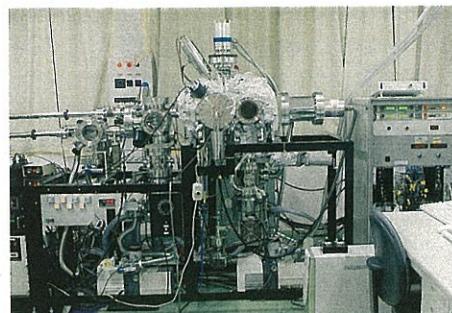
陽電子消滅同時計数ドッplerー広がり測定は、2台の半導体検出器によって、2本の陽電子・電子対消滅γ線のエネルギーの精密測定を行い、照射欠陥周囲および超微小析出物の化学元素分析を行う。陽電子寿命測定は、空孔や空孔集合体の寸法や数密度の評価を行う。

低速陽電子ビーム発生装置



数十eV～数十keVのエネルギー可変陽電子ビームを発生する装置。通常の陽電子消滅測定では、表面から100μm程度のバルク領域をプローブするが、低速陽電子ビームを用いること、試料表面近傍(数十nm～数μm)領域の欠陥や超微小析出物(c)になり、より高温(～650°C)まで残存することを、陽電子消滅測定によって見出した。

3次元アトムプローブ(3DAP)測定装置

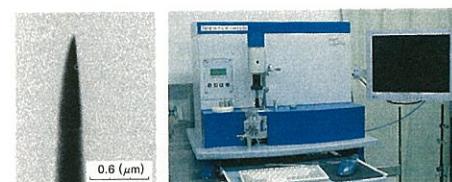


細い針状の試料にパルス高電圧を印可して針先端部の原子を1層づつ剥ぎ取り、イオンを位置敏感型検出器で検出することにより、ほぼ原子スケールの空間分解能で、原子1個1個を3次元マッピングできる装置。元素同定はエネルギー補償型飛行時間測定によって行なう。世界最高の分解能を誇る。これにより高分解能透過型電子顕微鏡でも観察が困難な超微小析出物の観察ができる。(物質・材料研究機構所管)

集束イオンビーム(FIB)装置



集束イオンビームを走査しながら照射することにより材料の精密加工を行う。放射化したTEM試料、3D-APFIM試料(左下写真)等の加工が可能である。また、ガリウムイオンによる材料表面の損傷は、同室に設置されている低エネルギーイオンソース搭載のジェントル・ミル(右下写真)で除去できる。

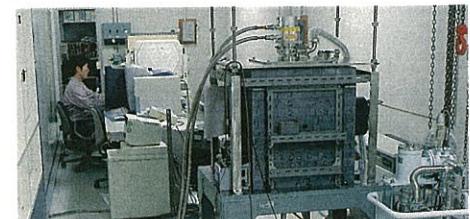


電子スピン共鳴(ESR)測定装置



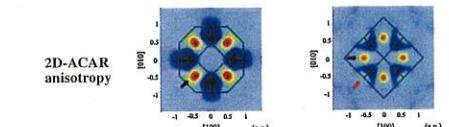
半導体やガラスなどの常磁性欠陥を敏感に検出・同定できる。液体ヘリウム温度での測定が可能である。

陽電子消滅2光子2次元角相関(2D-ACAR)測定装置[C棟]



2台の位置敏感型γ線検出器によって、2本の陽電子・電子対消滅γ線の放出角度相関分布を測定し、空孔型欠陥や超微小析出物の電子構造を明らかにする。

FCC Cu(Bulk) BCC Cu(Nano-particles)

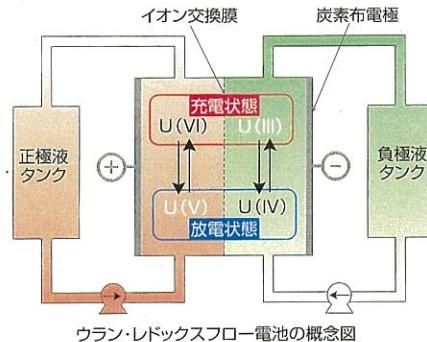


面心立方銅(バルク)および鉄中に析出した体心立方銅(ナノ粒子)のフェルミ面と2次元角相関(2D-ACAR)の異方性スペクトル。それぞれの最近接ブリルアン・ゾーンに接触するフェルミ面の突起(ネック)に由来する2D-ACAR異方性が観測される。この方法によって、原子炉圧力容器鋼照射脆化の主因である銅ナノ析出物の電子構造が明らかになった。

アクチノイド元素実験棟（A棟）

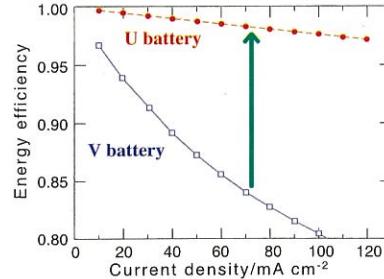
原子力発電に使用した燃料の中には多量のアクチノイド元素が含まれているが、その大部分は20世紀になって人類が造り出した元素である。アクチノイド元素は、磁性・超伝導・多様な酸化状態など物理的・化学的に他の元素には見られない特徴を持つことが知られつつあり、誕生して間もない元素の学術研究は人間の知的の要求に根ざし、新たな学問領域の開拓を目指すものである。本実験棟はマクロ量のアクチノイド元素を取り扱える唯一の大学共同利用センターであり、安全性を十分に配慮しながら、新しい材料研究の宝庫といえるアクチノイド研究が推進されている。さらに、放射性廃棄物の消滅処理用の新型燃料（アクチノイド水素化物）の研究開発も行っている。

エネルギー効率の高いアクチノイド電池の提案と開発

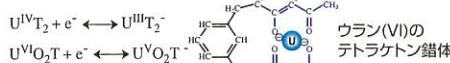


ウラン・レドックスフロー電池の概念図

エネルギー効率の高いウラン電池

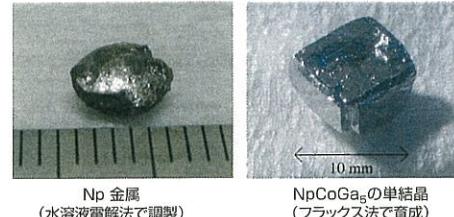


ウラン・テトラケトン錯体は、単純な電子授受で、高速の反応を実現

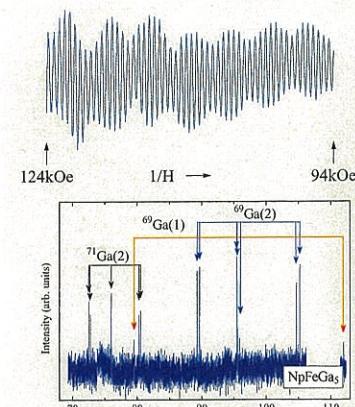


現在、原子力発電により発生する劣化ウランは、将来の需要に備えた保管物、マイナーアクチノイドは廃棄物とみなされている。ネツニウムやウランを利用した電力貯蔵用のレドックスフロー電池を提案して、エネルギー効率の高い活物質と溶媒の開発を進めている。

我が国初の超ウラン化合物の電子物性解明



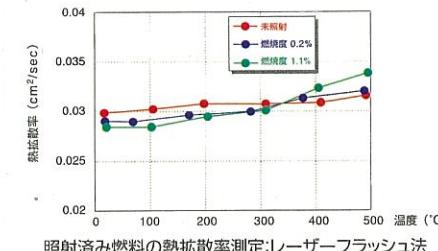
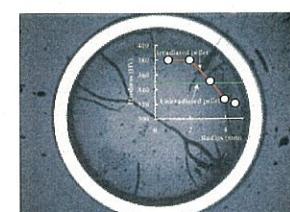
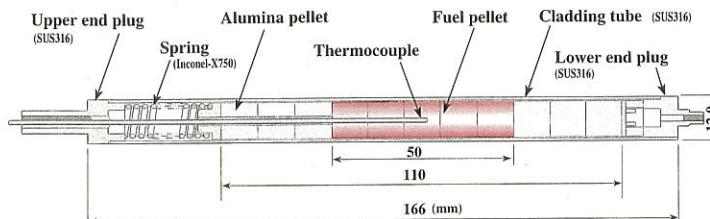
Np 金属 (水溶液电解法で調製)
NpNiGa₅ 単結晶 (フラックス法で育成)



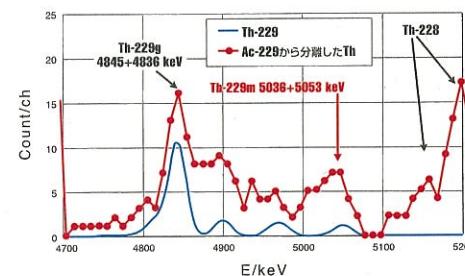
Np 化合物で初めて観測されたドハース・ファンアルフェン振動およびGa-NMRスペクトル

5f電子に由来した超ウラン化合物の興味深い磁性、超伝導などを、ドハース・ファンアルフェン効果、核磁気共鳴、メスバウアー効果、中性子散乱などのミクロスコピックなプローブを駆使して解明していく。現在、原子力研究所・先端基礎研究センターと協力して研究を展開している。

水素化物燃料・材料の開発

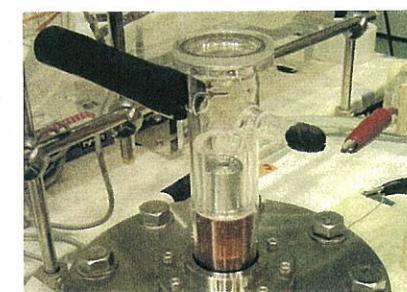


放射性崩壊寿命の人為的制御への挑戦 (Th-229mの崩壊特性)



Th-229mは紫外線で励起可能な核異性体で、電子架橋遷移で崩壊するので寿命に大きな化学効果が期待される。上図はTh-232の光核反応で生成したAc-229からの崩壊で生じたTh-229mのα線スペクトルである。半減期10~20時間で減衰するTh-229mを世界で初めて実験的に確認した。

Th-229g (5/2⁺)の外殻電子を励起すると、大きな電子架橋相互作用によりTh-229m (3/2⁺)への核励起が期待される。右図に中空陰極放電装置とAr雰囲気での陰極放電の様子を示す。この装置により化学的核励起の検証を進めている。



中空陰極放電装置

水素は多くの金属と安定な水素化物をつくることが知られている。金属として燃料 (U,Th,Pu)、長寿命廃棄物核種(Np,Am)、中性子吸収材 (Gd,Hf)を水素と組み合わせることにより減速性能を持つた燃料、長寿命廃棄物核変換処理ターゲット、バーナブルポイズンや制御棒の材料の開発が可能である。当センターではJMTRでの照射試験を中心とした水素化物燃料・材料の開発研究を行っている。



交通案内

[自動車]

北関東自動車道 水戸大洗ICから 15分
常磐自動車道 水戸ICから 50分
東関東自動車道 潮来ICから 80分

[JR常磐線]

水戸駅で 鹿島臨海鉄道 乗り換え、
大洗駅下車 タクシー10分
(宿泊所へは タクシー5分、徒歩15分)

[バス]

水戸駅から「大貫・鋸田行き」
大洗原研入口下車 徒歩20分
(宿泊所へは 海岸病院入口下車 徒歩3分)

[成田空港・羽田空港から高速バス]

水戸大洗インター下車 タクシー15分
(空港 ⇄ 水戸大洗インター 約2時間)



東北大學金属材料研究所 附属量子エネルギー材料科学 国際研究センター

〒311-1313

茨城県東茨城郡大洗町成田町

TEL 029-267-3181

FAX 029-267-4947

<http://www.oarai.imr.tohoku.ac.jp>

東北大學金属材料研究所

〒980-8577

仙台市青葉区片平2-1-1

TEL 022-215-2181 (総務課)

FAX 022-215-2184

<http://www.imr.tohoku.ac.jp>

