



照射後試験技術の開発

永峯 剛 吉持 宏 阿部 康弘

大洗工学センター 照射施設運転管理センター 燃料材料試験部

Development of Post-Irradiation Examination Technique for MK-III

Tsuyoshi NAGAMINE Hiroshi YOSHIMUCHI Yasuhiro ABE

Fuels and Materials Division, Irradiation Center, O-arai Engineering Center

照射性能を大幅に向上させた高速実験炉「常陽」のMK-III炉心では、MA含有MOX燃料、酸化物分散強化型フェライト鋼被覆管燃料、金属燃料などの新たな照射試験が計画されている。

大洗工学センターの照射センターでは、1971年以降、「常陽」で照射されたものを主に、様々なタイプのMOX燃料や燃料被覆管材料などの照射後試験を実施してきた。また近年は、MK-IIIでの照射試験に対応して、照射後試験の技術開発や施設設備の整備を進めている。

本報では、照射センターに属するホットラボ3施設の概要とその試験実績に加え、照射リグの再組立、MA含有MOX燃料製造試験などを含め、MK-IIIに向けた最近の照射後試験技術について設備の整備、試験手順を確立した実証による試験結果などを紹介し、多様な照射試験に対応できる照射後試験技術開発の状況を報告する。

In the MK-III core of the fast experimental reactor "JOYO", which raised the irradiation performance sharply, new irradiation tests are planned for MA-MOX fuel, long life fuel with oxide dispersion strengthened ferrite steel cladding, metal fuel and so forth.

In the Irradiation Center of O-arai Engineering Center, many post-irradiation examinations (PIE) have been conducted since 1971 for various types of MOX fuel, fuel cladding material, etc. irradiated mainly by JOYO. And recently, for the irradiation tests in the MK-III core, the technical development of PIE and the arrangement of facility equipment have been advanced.

This report describes the latest technical development of PIE including the re-assembling of irradiation rigs and the fabrication test of MA-MOX fuel, in addition to the outline of three hot laboratories belonging to the Irradiation Center and the achievements of PIE.

キーワード

「常陽」、MK-III炉心、MA含有MOX燃料、照射試験、燃料被覆管材料、照射後試験、ホットラボ、照射リグ、再組立、燃料製造試験

JOYO, MK-III Core, MA-MOX Fuel, Irradiation Test, Fuel Cladding Material, Post-Irradiation Examination, Hot Laboratory, Irradiation Rig, Re-Assembling, Fabrication Test



永峯 剛

照射燃料集合体試験室所属
技術主幹
高速炉燃料集合体及び燃料要素の照射後試験の実施・評価に従事



吉持 宏

照射燃料試験室所属
副主任技術員
MA燃料製造及び照射済MOX燃料の照射後試験の実施・評価に従事



阿部 康弘

照射材料試験室所属
副主任技術員
照射後材料試験の実施・評価及びホットラボ用試験機器の開発・整備に従事

1. はじめに

高速炉で使用する燃料集合体や制御棒などの炉心構成要素は、高燃焼度など実用化に向けてより一層の高性能化が求められている。高性能化にあたっては、高速中性子束下及び高温液体ナトリウム中という高速炉特有の照射環境下での燃料・材料の性能を確認しつつ進めることが不可欠である。

大洗工学センターには、そのためのホットラボ3施設が稼働している。そこでは、同じサイトにある高速実験炉「常陽」をはじめとして国内外で照射された数多くの燃料・材料の照射後試験を実施してきた。得られたデータは、「常陽」の燃料設計、高速増殖原型炉「もんじゅ」の設工認や実用化に向けての設計研究に反映されてきた。

「常陽」MK-炉心では、マイナーアクチニド(MA)*含有燃料や酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼**被覆管燃料など、これまでになかった燃料・材料の実用化に向けたさまざまな照射試験が計画されている。

ホットラボ3施設においてはこれまで、測定精度を高めるといったことに加え、多様な試験条件

に対応できる照射後試験技術の開発を進めてきた。「常陽」MK-炉心を利用した新たな照射試験についても、それに対応可能なように各種取組みを進めている。

本報では、ホットラボ3施設の概要とこれまでの照射後試験実績を述べるとともに最近の照射後試験技術の開発について紹介する。

2. 照射後試験施設の概要¹⁾

大洗工学センター照射施設運転管理センター(照射センター)のホットラボは、3施設で構成される。照射燃料集合体試験施設(Fuels Monitoring Facility: FMF)では、燃料集合体、燃料要素の非破壊試験、燃料や材料の機器分析などを行う。照射燃料試験施設(Alpha-Gamma Facility: AGF)では、燃料の物性測定試験やMA燃料製造及びその分析などを行う。照射材料試験施設(Materials Monitoring Facility: MMF)では、材料の物性測定試験、高温強度試験などを行う。FMFを中心とした施設間の試験試料の流れを図1に示す。

本章では、これら3施設の概要を述べる。

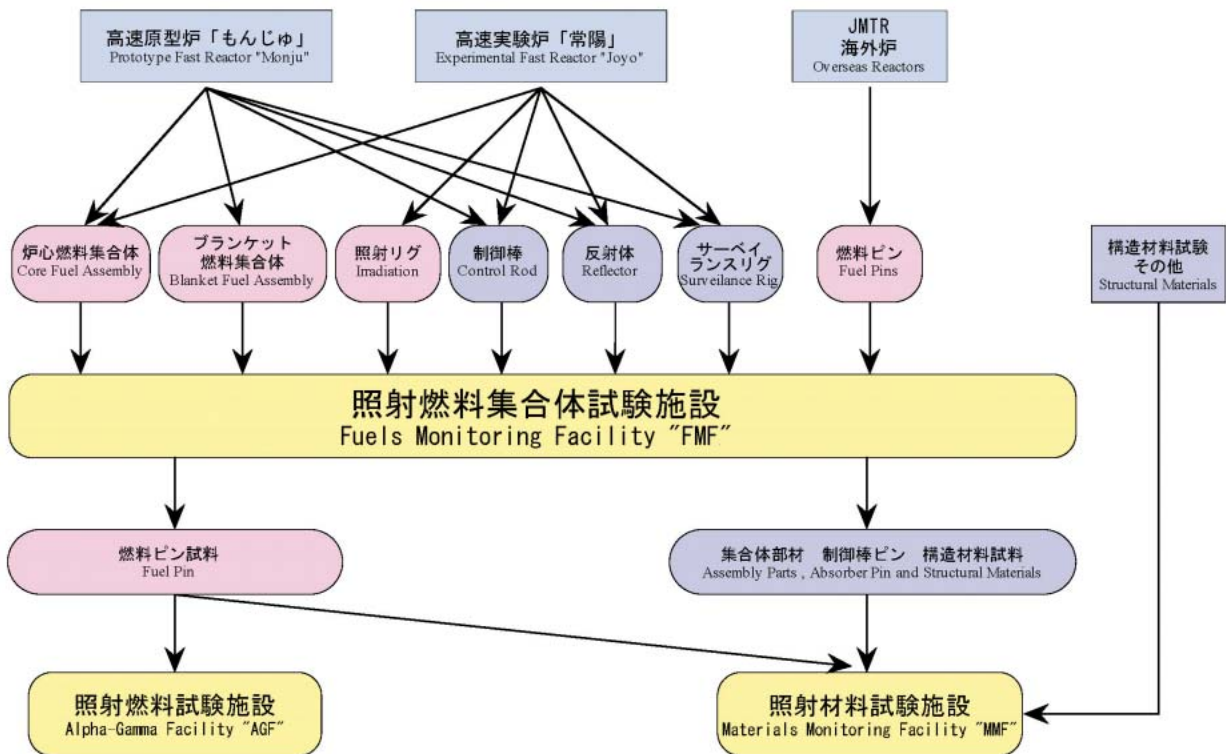


図1 FMFを中心とした試験試料の流れ

* マイナーアクチニド(MA): 使用済燃料の再処理から生じる高レベル放射性廃棄物などに含まれるネプツニウム(Np), アメリシウム(Am), キュリウム(Cm)など。
 ** 酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼: イットリウム(Y_2O_3)などの酸化物粒子をメカニカルアロイング法にて微細分散させ、スエリング(中性子照射による体積増加)抵抗性に優れ、高温強度の改善を図った材料。

2.1 照射燃料集合体試験施設(FMF)

FMFは、「常陽」を対象としたFMF既設と「もんじゅ」などの大型集合体も扱えるFMF増設で構成され、「常陽」の西側に隣接している。本施設では、照射後試験用集合体の受入れ・解体、関連施設における照射後試験実施のための試料調製を行っている。また、継続照射用集合体の中間検査及び再組立を実施し、多様性のある照射試験にも貢献している。

「常陽」からの集合体搬入には、使用済燃料プールにおいて冷却を行った後キャスクで搬入する方法、キャスクカーにより金属ナトリウムが付着した状態で直接原子炉から窒素ガス雰囲気試験セルへ搬入する方法がある。なおFMF増設施設には、キャスクで搬入することになる。

照射済の試料を扱うホットセルは、全部で8セルある。この内、試験セル、除染セル、金相セル及び増設施設の第2試験セル、第2除染セルは、プルトニウムを含む燃料を扱うため密封型(- セル)である。また、試験セル、第2試験セル及び金相セルは、金属ナトリウムの安全取扱や試験試料の酸化を防ぐため窒素ガス雰囲気に保たれている。

FMF既設のセル仕様と照射後試験項目を表1に示す。主な照射後試験の内容は、集合体単位の非破壊試験(外観検査、寸法測定、X線ラジオグラフィなど)、燃料要素単位の非破壊試験(重量測定、外観検査、寸法測定、スキャニングなど)及び破壊試験(燃料の組織観察、表面微小分析などの金相試験を含む)であり、さらにより詳細な試験を他施設で実施するための試料調製を行う。また、B型照射燃料集合体など計測線を持たず照射情報はオフライン型モニタを用いるオフライン照射燃料集合体の再組立のための設備は、クリーンセルに設置している。

FMF増設のセル仕様と照射後試験項目を表2に示す。照射後試験の内容は、集合体単位の非破壊試験(外観検査、寸法測定、X線CT検査など)と燃料要素単位の非破壊試験(外観検査、寸法測定、渦電流探傷試験、スキャニングなど)であり、パンクチャ試験などは試料を既設試験セルに施設内移送して行う。また、温度制御型材料照射装置(Material Testing Rig With Temperature Control: MARICO)の遠隔組立のための設備は、増設第2除染セルにその都度設置する。

2.2 照射燃料試験施設(AGF)

AGFは、日本原子力研究所材料試験炉JMTRの隣に位置しており、プルトニウムを含む照射済燃料を扱う国内最初の - 型のホットラボとして建設された。建家内には、ホットセルが22基、グローブボックスが16基設置され、その取扱いは空気雰囲気となっている。これまで「常陽」をはじめ海外の高速炉であるDFR、Rapsodie、Phenixなどで照射されたウラン及びプルトニウム混合酸化物燃料(MOX燃料)の照射後試験を行ってきた。

ここでは、照射済MOX燃料などの物理的、化学的性質を把握するための試験研究が中心である。FMFなどの施設において解体・切断した照射

表1 FMF既設の主な試験装置一覧

セル名称 (雰囲気)	試験項目	試験装置名
試験セル (窒素ガス)	集合体外観検査	・ペリスコープ ・トランシット ・蛇腹式大型カメラ
	集合体Na洗浄	・集合体ナトリウム洗浄装置
	集合体寸法検査	・集合体寸法測定装置
	集合体解体	・集合体解体機
	集合体部材切断	・部材切断機
	燃料要素重量測定	・ピン重量測定装置
	燃料要素寸法測定	・ピン寸法測定装置
	燃料要素詳細外観検査	・ピン外観検査用 特殊観察装置
	燃料要素パンクチャ試験	・燃料ピンパンクチャ装置
	燃料要素スキャニング	・燃料ピン スキャニング システム
燃料要素の切断	・長尺燃料ピン切断機	
除染セル (空気)	試料・機器等除	-
	燃料要素の封入	・封入缶溶接装置
クリーンセル (空気)	封入缶リーク試験	・Heリーク試験
	特殊燃料集合体再組立	・特燃再組立装置
金相セル (窒素ガス・空気)	光学顕微鏡写真撮影	・金属顕微鏡
	微小領域元素分析	・遮蔽型X線マイクロアナライザ(SXMA)
	二次電子像写真撮影	・遮蔽型 走査型電子顕微鏡(SEM)
ラジオグラフィセル (空気)	微小領域質量分析	・遮蔽型イオンマイクロアナライザ(IMA)
	X線ラジオグラフィ	・X線ラジオグラフィ装置

表2 FMF増設の主な試験装置一覧

セル名称 (雰囲気)	試験項目	試験装置名
第2試験セル (窒素ガス)	集合体外観検査	・集合体縦型試験装置 (ハイビジョンITV) ・蛇腹式大型カメラ
	集合体解体	・集合体縦型試験装置 (解体部)
	集合体寸法検査	・集合体縦型試験装置 (寸法測定部)
	集合体部材切断	・集合体横型試験装置
	燃料要素重量測定	・ピン試験装置(1) (重量測定装置)
	燃料要素形状 (寸法)測定	・ピン試験装置(1) (レーザー寸法測定装置)
	燃料要素 スキャニング	・ピン試験装置(2) (スキャニングシステム)
	燃料要素 寸法測定	・ピン試験装置(2) (レーザー寸法測定装置)
	燃料要素 詳細外観検査	・ピン試験装置(3) (詳細外観検査装置)
	燃料要素 渦電流探傷	・ピン試験装置(3) (渦電流探傷装置)
第2除染セル (空気)	MARICO*の再組立	・MARICO再組立装置
	缶詰缶等の開缶	・缶取扱装置
	缶詰缶等の洗浄	・洗浄装置
CT検査室 (空気)	X線CT検査	・X線CT検査装置

MARICO* : Material Testing Rig with Temperature Control
温度制御型材料照射装置をいう

済燃料ピンの切断片を試料として、セル内で試料調製後、燃料の金相観察、元素分析、物性測定(X線回折、融点、熱伝導度)、FP放出挙動、燃焼率測定、放射線計測などの試験を行い、高速炉燃料の照射挙動評価を行っている。

AGFではサイクル機構で進めている実用化戦略調査研究(FS)の一環として、環境負荷低減などに係る研究開発のため、MA核種のうちAmを混合酸化物燃料に含有させた燃料試料を、セル内で遠隔操作により製造する小規模設備を設置し、遠隔燃料製造技術の開発を進めている。また、MAが照射挙動に与える影響を評価するため照射済燃料中のMA核種分析技術の開発も進めている。

AGFにおける主な試験装置一覧を表3に示す。

2.3 照射材料試験施設(MMF)

MMFは、MMFとMMF-2で構成され、「常陽」の南側に位置しており、通路で連結され一つのホットラボとして運転している。ここでは、主に

表3 AGFの主な試験装置一覧

セル名称	試験項目	試験装置名
No.1-1セル*	ピン加工検査	被覆管・端栓溶接装置 (Tig溶接)
		X線透過装置
		Heリーク検査装置
No.1-2セル**	ペレット検査	寸法・密度検査装置
	ペレット充填	ペレット充てん・除染装置
No.3-1セル**	ペレット製造 (粉末調製)	粉末供給装置
		粉碎混合機、振動機
		ペレット成形機
No.3-2セル**	ペレット製造 (焼結)	予備焼結炉
		本焼結炉
		ペレット研削機
No.L-1セル**	燃料組織観察	光学顕微鏡
No.4セル**	試料調製	電子ビーム溶封装置
		イオン腐食装置
No.5セル**		切断機、研磨装置
No.6セル**		ペレット溶解
No.11セル**	微小元素分析	電子線マイクロアナライザー
No.12セル**	燃料組織観察	光学顕微鏡
No.14セル**	FPガス放出挙動試験	FP放出挙動試験装置
No.15セル**	X線回折測定	X線回折装置
No.16セル**	融点測定	融点測定装置
No.18セル**	熱伝導率測定	レーザーフラッシュ熱伝導度測定装置
化学室	試料調製	イオン交換分離装置
	ペレットQ分析 (蒸発性不純物、フッ素、塩素、水分)	蒸発性不純物分析装置
		イオンクロマトグラフィ
		水分分析装置
恒温室	MA分析	・放射線計測装置
	ペレットQA分析 (金属不純物)	高周波プラズマ発光分光分析装置
測定室	Pu同位体測定	質量分析装置
実験室	O/M比測定	示差熱重量計(TG-DTA)
	弾性率測定	超音波弾性定数測定装置
	試料調製	切断機、研磨装置

* : 負圧型セル(- セル)

** : 気密型セル(- セル)

「常陽」及び海外の高速炉で照射された高速炉用の炉心材料(燃料被覆管、ラッパ管)、構造材料、制御棒吸収材料やJMTRで照射された構造材料の照射後試験を行っている。

照射済試料を取扱うホットセルは、MMF、MMF-2、合わせて14基あり、この内、主に核燃料物質を扱う密封型セル(- セル)は3基、主

に放射性同位元素 (RI) を扱う負圧型セル (- セル) は11基となっている。なお, MMF-2の No.1セルと No.2-1セルは, 窒素雰囲気での運転が可能となっている。

MMFの主な照射後試験装置を表4に示す。燃料被覆管関係の試験装置は主に - セルに設置しており, 高压ガス製造設備で製造した高压アルゴンガスを加圧媒体として, 被覆管試料に内圧負荷を与え, 破断時の圧力, 温度, 時間及び外径変化などを測定している。

「常陽」や「もんじゅ」のサーベイランス試験など構造材料やラッパ管, ワイヤー関係の試験装置は, - セルに設置しており高温強度特性やスエリング特性などの評価を行っている。

制御棒吸収材料関係の試験装置は主に実験室に設置しており, 熱伝導率や熱膨張率などを測定している。また, 原子炉材料の照射損傷をマイクロレベルで解明するために, 透過型電子顕微鏡 (TEM) や電界放射型透過電子顕微鏡 (FE-TEM) を用いている。

「常陽」MK- に向けた新たな装置として, ラッパ管や被覆管から直接材料試験片を製作できる放電加工装置 (EDM) やインパイル用内圧封入型クリープ試験片にタグガスを封入するためのタグガス封入装置を新設した。

3. 照射後試験の実績

照射センターのホットラボでは, 高速炉用燃料及び材料の開発のための照射後試験を実施する役割を担っており, AGFが1971年に, MMFが1973年 (MMF-2は1984年) に, そしてFMFが1978年 (FMF増設は1999年) に操業を開始した。それぞれ32年, 30年, 25年が経過し, これまでに214体の「常陽」照射燃料集合体などの炉心構成要素, 2000試料以上の照射燃料の試験・解析, さらに7000試料以上の材料などの試験を実施している (図2)。

照射センターのホットラボにおける照射後試験は, 以下の4期に分けることができる。

海外炉で照射された燃料と材料の照射後試験を主体とする段階 (第1期)

「常陽」増殖炉心 (MK-) の炉心構成要素の照射後試験を主体とする段階 (第2期)

「常陽」MK- で照射された燃料と材料の照射後試験主体とする段階 (第3期)

「常陽」MK- で照射された燃料と材料及び

表4 MMFの主な試験装置一覧

セル名称	試験項目	主な試験装置名
被覆管試験セル*	外観検査	ステレオ式L型ペリスコープ
	寸法検査	レーザー外径測定装置
	急速加熱バースト試験	高温強度試験機
	バースト試験	バースト試験機
	内圧クリープ試験	内圧クリープ試験機 (3台)
	引張試験	引張試験機
スエリング測定	密度測定装置	
ローディングセル**	外観検査	ステレオ式L型ペリスコープ
工作セル**	材料試験片加工	精密試験片加工装置 (EDM)
研磨セル**	組織観察試料の調整	研磨装置 (8台), 切断機
光顕セル**	微細組織観察, 硬さ測定	光学顕微鏡, ピッカース硬さ計
	疲労試験	疲労試験機
試験セル**	破壊靱性試験	破壊靱性試験機
	引張試験	引張試験機
	衝撃試験	計装化シャルピー衝撃試験機
	寸法測定	レーザー外径測定装置
単軸クリープセル**	クリープ試験	単軸クリープ試験機 (10台)
貯蔵セル**	照射試料の保管	貯蔵ビット
No.1セル*	被覆管からの燃料除去	脱ミート装置
No.2-1セル*	外観検査	ステレオ式L型ペリスコープ
No.2-2セル**	照射試料の受払い	
No.3セル**	クリープ疲労試験	クリープ疲労試験機 (2台)
No.4セル**	外観検査	P型ペリスコープ
	寸法検査	レーザー外径測定装置 長さ測定器
	スエリング測定	密度測定装置
	重量測定	電子天秤
No.5セル**	クリープ試験	単軸クリープ試験機 (5台)
試験室	電子顕微鏡観察	電界放射型透過型電子顕微鏡 (FE-TEM)
ガス分析室	ガス分析試験	四重極質量分析計
	TEM試験片加工	収束イオンビーム装置
物性室	熱伝導率測定試験	レーザーフラッシュ熱定数測定装置
	熱膨張測定試験	熱膨張測定装置
電顕室	電子顕微鏡観察	透過型電子顕微鏡 (TEM)
分析室	組成分析	高周波プラズマ発光分光分析装置 (ICP)
コールド試験室	ガス封入	内圧封入装置 タグガス封入装置

* : 気密型セル (- セル)

** : 負圧型セル (- セル)

「もんじゅ」炉心構成要素の照射後試験を主体とする段階 (第4期)

第1期では, 東海事業所ブルトニウム燃料センターで製造したMOX燃料を仏国Rapsodie炉など海外で照射した試料を取扱った。これらの試料は

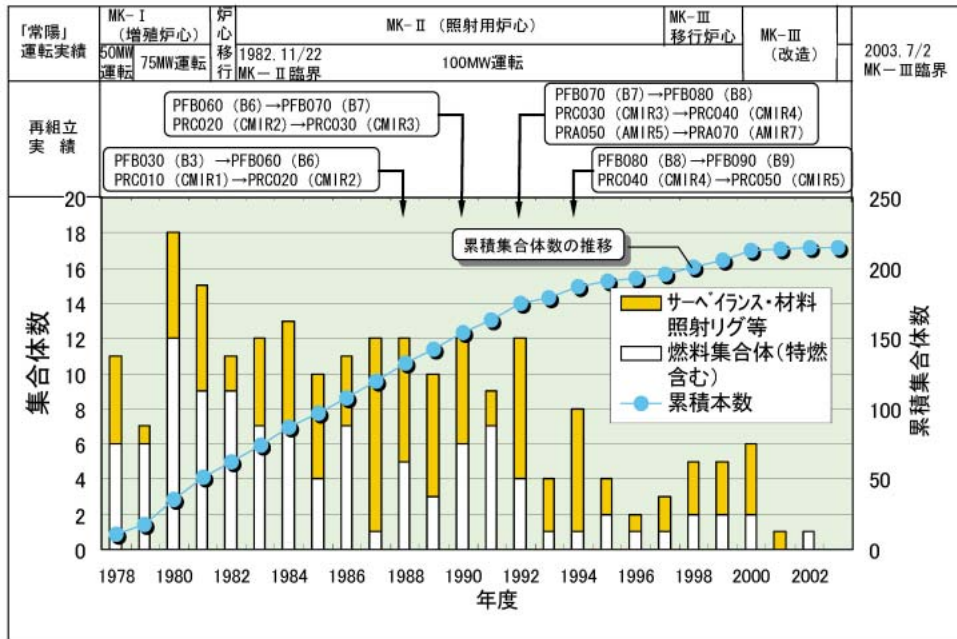


図2 照射センターにおける「常陽」照射後試験実績

日本に持ち帰り、燃料要素の外観検査、寸法測定、重量測定などの基礎的な照射後試験と燃料ペレットの金相写真、燃焼度の分析、材料の強度試験などを実施し、国内で初めてMOX燃料の炉内挙動の情報を取得した。

第2期では、「常陽」における炉心構成要素の健全性確認及び増殖特性把握のため燃焼度をパラメータとして炉心燃料集合体を段階的に取出し、集合体の寸法測定、燃料要素の各種非破壊検査、オーステナイト系ステンレス鋼(SUS316)製被覆管の組織観察、硬度変化、機械的強度試験及び燃料の燃焼度分布の測定などを実施した。特に1980年頃、スパーサワイヤによる被覆管の擦り痕が確認された際は、擦り痕抑制対策検討のため改造型燃料集合体の照射後試験を行い、抑制対策の効果を確認し、その成果は「常陽」及び「もんじゅ」に反映した。

第3期では、「常陽」がMK-II照射用炉心に移行し、特殊燃料集合体や材料照射リグによる照射試験及び製造キャンペーンごとの炉心構成要素を主な試験対象とした。高度な照射後試験と照射挙動評価が要求され、照射済MOX燃料ペレットの融点などの物性試験、燃料ペレット中のボイドの移動・分布、核分裂生成物やプルトニウムの分布測定、さらには被覆管のスエリング測定、急速加熱バースト試験などが可能となり照射後試験技術は

一層進展した。また照射途中において中間検査の後、再び集合体に組み立て、「常陽」にて継続して照射する継続照射技術も確立し、同一試験料による照射量をパラメータとしたデータ取得が可能となった。

このような照射後試験結果は燃料挙動解析コードCEDAR (Code for Thermal and Deformation Analysis of Reactor Fuel Pin) にも反映され、過渡時を含む燃料照射挙動を評価できるようになっている²⁾。また、「もんじゅ」の使用条件に相当する高燃焼度に到る燃料の熱的挙動、材料の照射挙動を明らかにし、スエリング、照射クリープ、被覆管内面腐食、ナトリウム腐食特性等のデータを蓄積した。それらの成果は、「常陽」や「もんじゅ」の設計基準の合理化などに反映されている。

現在は第4期に入った段階にあり、照射性能を向上させた「常陽」MK-IIでは、高速炉の燃料材料開発に限らず受託照射として外部利用者への照射場の提供を積極的に進め、それに対応した照射試験を行う計画である。

4. 照射後試験技術の開発

照射センターのホットラボでは、これまで測定精度を高めるといった各種照射後試験技術の高性能化に加え、多様な試験条件に対応できる照射後試験技術の開発を進めてきた。「常陽」MK-II炉

心を利用した新たな照射試験への対応についても継続的に取り組んでいる。本章では、最近の代表的な照射後試験技術開発について紹介する。

(1) 照射後試験用X線CT装置

照射済の燃料集合体は、強い線放射体である。そのためX線CT (Computed Tomography) 検査技術の適用は不可能と考えられていた。しかし、パルス状高エネルギーX線を利用してそのX線と同期するようにX線を検出することによって鮮明な断面画像を得ることに成功した³⁾。集合体を挟んで向かい合うように配置したX線発生源とX線検出部は、集合体を中心にして並進運動と回転運動を交互に繰り返しながらX線透過を行い、180度回転させて1断面の撮像が終了する。撮像時間は、1断面あたり通常スキャンモードで20分である。

X線CTデータの活用は、燃料要素束とそれを収納するラッパ管との機械的相互作用 (Bundle-Duct Interaction: BDI)⁴⁾ の発生状況の確認が主たる目的である。CT画像の目視による観察では、ラッパ管内での燃料要素の変位量など定量的な評価はできない。そこでCT画像がデジタルデータ (CT値) で構成されていることに着目し、定量化する手法を確立した⁵⁾。

燃料要素の位置の定量化は、まず被覆管外面の境界座標を求め、この座標を楕円方程式にて最小二乗法で最適化し、その楕円の重心を燃料要素の中心座標とした。この測定精度は、寸法が既知の模擬試料の測定結果から $\pm 0.05\text{mm}$ 以下であることを確認した。また、ラッパ管の位置も、 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内の精度で定量化できることを確認した。このように燃料要素中心座標及びラッパ管位置を定量化することにより、燃料要素 - 要素間距離や、燃料要素 - ラッパ管間距離、冷却材流路断面面積などを求めることが可能となった。

炉心燃料部について軸方向20断面のCT検査を実施し、定量化によって求めた最外周燃料要素とラッパ管内面の距離の軸方向分布を図3に示す。燃料要素とラッパ管の間にワイヤスペーサが存在する軸位置では、その距離は0.7mm以上確保されているが、ワイヤスペーサの存在しない軸位置では、最小0.15mmまで燃料要素とラッパ管が接近していることがわかる。

最外周燃料要素においては、ラッパ管側ではその反対側である燃料要素束側に比べ照射中の被覆

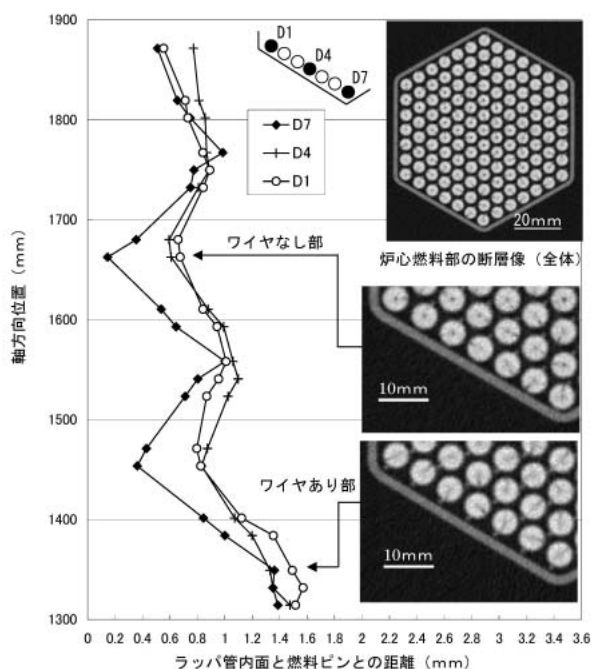


図3 CT検査によるラッパ管と燃料ピンとの距離の軸方向分布

管温度が低くなる。このため照射中は、ラッパ管側よりも燃料要素束側の方が、熱膨張量が大きくなり、熱湾曲が発生する。この熱湾曲が最外周燃料要素の曲がり挙動に影響を及ぼしている。

今後、燃料要素の曲がり挙動について、熱湾曲やスエリング、照射クリープなどを考慮した一次元梁モデルによる解析及びスペーサワイヤによる局所的な曲がり挙動解析を進める計画である。

(2) 融点測定装置

高速炉燃料の設計においては、燃料の溶融を防止する観点から、燃料の最高使用温度の制限値が融点の照射挙動評価結果を考慮し設定されている。融点測定装置は、最高加熱温度3,000 の高周波誘導加熱炉、到達真空度 $\sim 0.3\text{Pa}$ の真空排気系及び温度制御記録系より構成されている。主な特徴として、加熱時での加熱炉内構成部品 (タングステン製) からの蒸発による温度計光軸の汚れに対しては、光軸ガラスの遠隔交換が可能となっている。

燃料融点の測定手法は、フィラメント法とカプセル法があるが、AGFでは燃料加熱中のO/M(酸素/重元素重量比)の変化や燃料蒸気などによる測温系への影響を避けるため、カプセル封入式のサーマルレスト法を採用している。カプセルはタングステン製であり、外径14mm、高さ40mm

の円筒形状でこの中に燃料試料を入れ、電子ビーム溶接により密封する。装置本体、真空排気系はセル内に設置されており、操作は全て遠隔で行われる。燃料試料入りカプセルは真空雰囲気中で高周波加熱により、一定速度で加熱され、カプセル底部に設けてある測温孔を赤外線放射温度計で連続測温し、得られた温度履歴曲線から燃料溶融時の潜熱による屈曲点を読取り、融点を求める。これまでに取得した照射済MOX燃料の融点を図4に示す⁶⁾。フィラメント法に比べて、カプセル法の測定精度ははるかに良好であること及びMOX燃料の融点は燃焼伸長とともにゆるやかに低下することが認められた。

今後、MA含有MOX燃料をはじめ新型燃料の測定データを取得していく予定である。なお、現融点測定装置は、これまでの装置に比べ加熱炉の小型化、高線量化防止フィルタの設置、ファイバー式赤外線放射温度計の採用など、保守性及び温度計測系に高度化を図った装置となっている。

(3) FP放出挙動試験装置

原子炉事故時に燃料から放出される放射性核種の種類、化学形、量などソースターム評価を行うことは、原子炉のシビアアクシデントに関する安全研究として重要である。

本装置は、高速炉燃料からのFP放出現象に関する実験的データを取得することを目的に設置したものであり、事故時を模擬するため燃料溶融領域まで昇温可能な加熱部、操作盤、FP核種分析部、ガス分析部などより構成される。装置の概要を図5示す。燃料試料の加熱速度は最大25 /sec

で、最高3,000 まで加熱することができる。加熱方式として高周波誘導加熱を採用している。昇温により放出されるFPは分別捕集の温度勾配管、焼結金属フィルタ要素等で捕集され、線スペクトル測定により同定される。また、希ガスについては遮蔽壁外に設置されたガスクロマトグラフや質量分析装置によって分析される。

2000年以降「常陽」照射済MOX燃料を用いた試験を実施し、最高加熱温度3,000 における線分析及びガス分析によるFP放出挙動データを取得した。試験結果の一例を図5に示す。スペクトル分析では、揮発性FPであるCs-137, Cs-134の放出は、加熱初期に放出速度が急激に上昇し、その後緩やかに低下していくことがわかった。一方、ガス分析では、FPガスは加熱開始後パースト状に放出されることが明らかとなり、Kr, Xe各々単独で評価することができ、ソースターム評価上重要なデータを得ることができた。なお、図5に示した試験結果でXeの放出特性がKrと比較して遅れが生じているが、これは放出ガスを質量分析装置まで導く配管の途中に設置したヨウ素トラップ(銀ゼオライト)の影響であり、実際にはKrと同じ放出特性であることを確認している。

(4) 電界放射型透過電子顕微鏡 (FE-TEM)

高速炉材料は、高いエネルギーを有する中性子が照射されることにより機械強度特性の低下や寸法変化などが生じる。

これらの材料特性変化は材料内部の組織変化に起因しており、MMFではこの組織変化挙動をミクロの視点から調べるために、透過型電子顕微鏡

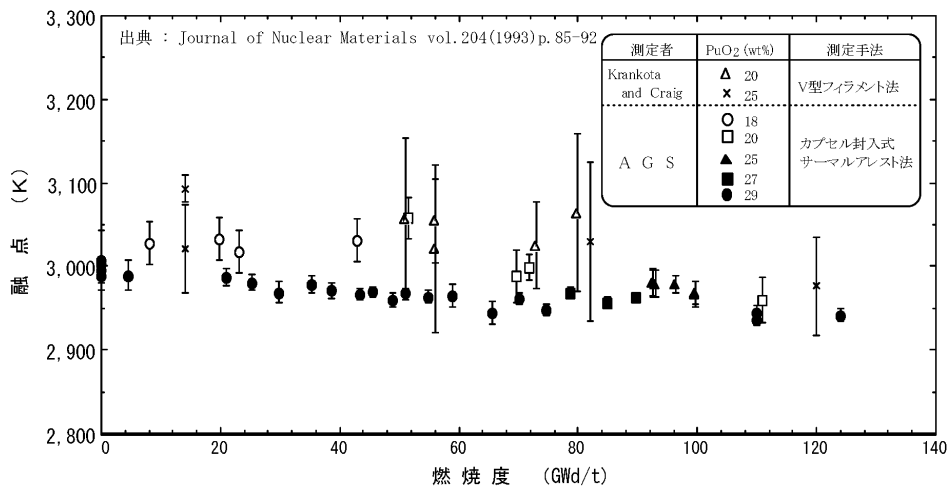
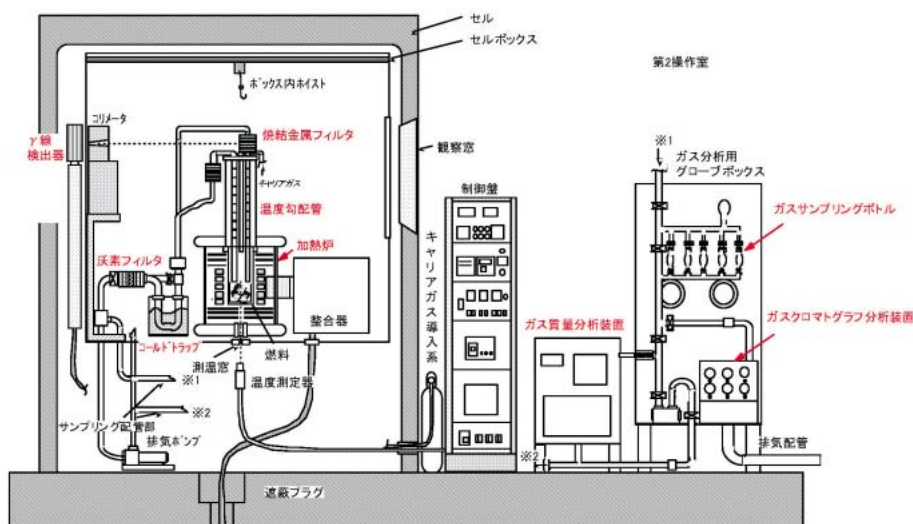


図4 高速炉MOX燃料の融点の燃焼度依存性



FP 放出挙動試験装置の概要

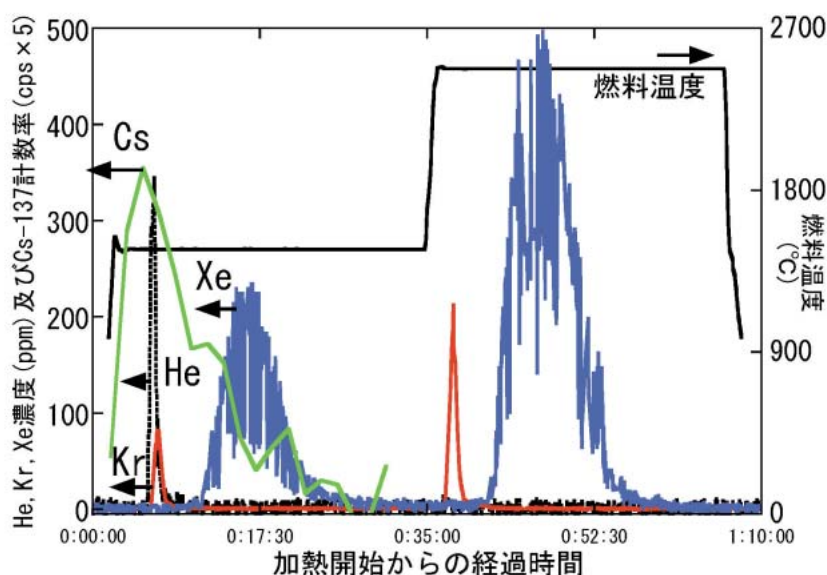


図5 FP 放出挙動試験装置の概要と試験結果例

(Transmission Electron Microscope : TEM) による微細組織観察を行っている。これまで主に照射材料中にある直径数10~100nm程度の析出物やポイドについて観察・解析を行ってきた。しかしこれらの挙動解明のためには、ポイドの前駆体である直径数ナノメートル(nm)程度のパブルの形成挙動や合金元素の偏析状況など、より照射組織発達過程に近い挙動を詳しく調査する必要がある。また、昨今精力的に開発を進めているODSフェライト鋼ではnmオーダーの分散粒子の形成・分散状態が材料特性に直結しており、照射前後での分散粒子の変化を把握することが重要な課題の一つとなっている。

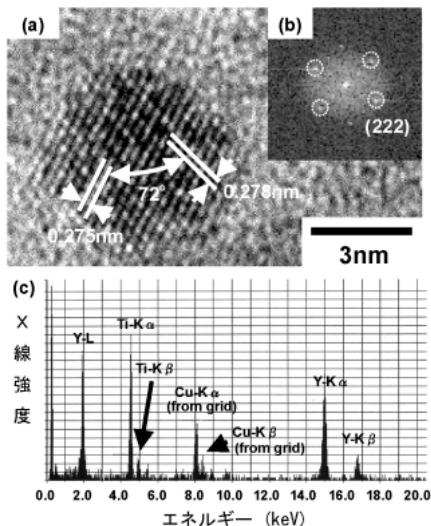
これらの課題に対しては既存のTEMでは不可能である原子レベルでの組織観察及び数nm程度の領域の組成分析が要求されることから、新たに電界放射型透過型電子顕微鏡(Field Emission Transmission Electron Microscope : FE-TEM)をMMFに導入した。装置はFE-TEM本体と元素分析装置であるエネルギー分散型X線分光分析装置(EDS)から構成されている。FE-TEMは高輝度かつ安定した電子ビームを発生することができ、またその電子ビームを直径1nm程度まで絞り込むことができるため、100万倍以上の高倍率で高分解組織観察や直径数nmといった微小領域の元素分析が可能である。

図6にODSフェライト鋼分散粒子の高分解能像及び組成分析結果を示す。高分解能像から、分散粒子は面間隔が0.275nmと0.278nmの2つ結晶面が72°の角度関係にあることがわかる。またEDSによる分析結果から、分散粒子はイットリウム(Y)-チタン(Ti)-酸素系の複合酸化物であり、YとTiの組成比は約0.7であることがわかった。これらの結果を総合的に検討することにより、この分散粒子は立方晶系の $Y_2Ti_2O_7$ と推察された。このようにFE-TEMによって、析出物及び析出物と母相の界面の構造や元素の分布状態を調べることができるようになり、材料の中性子照射挙動解明においてこれまでにない新しい知見を得ることが期待できる。

(5) 遠隔操作型精密試験片加工装置

MMFでは、照射後材料試験の評価技術の進展に対応した多様な形状の試験片製作が求められている。しかし、これまでのホットセル内設備では、照射したラッパ管や燃料被覆管から様々な形状の試験片を加工することができなかった。そのため、形彫り式放電加工を利用した遠隔操作型精密試験片加工装置を開発し、セル内に設置した。

放電加工は絶縁性をもった液体中において工具となる電極と素材との間で直接放電を発生させ、放電による熱で素材を溶融し、その時の衝撃圧力によって加工を行うものである。



ナノ複合酸化物粒子Ti-Y-O(レプリカ膜)の高分解能像(a),FFT(b),及び典型的粒子からのEDSスペクトル(c)。粒子形態は球状であり、Cuピークは支持グリッドからの影響。

図6 ODSフェライト鋼分散粒子のFE-TEM高分解能像及び組成分析結果

本装置は、加工装置本体、加工液循環装置、制御装置で構成され、銅合金製の試験片型電極により試験片を加工する。本装置で加工した試験片を写真1に示す。

この装置の特徴は、FMFで約150mm長さに切断したラッパ管を本体加工槽に装着して、六角形ラッパ管の各面から直接材料試験片を加工採取することができることである。また、マニプレータによる遠隔操作性に加えて保守性を考慮した構造となっており、本体はユニット毎に遠隔交換が可能となっている。加工液には可燃性のケロシン油に代え、水を精製したイオン交換水を用いており、試験片加工中の安全性を確保している。また、加工屑によるホットセル内の汚染拡大防止のため、加工液循環系にろ過フィルタに加え加工屑の磁化特性を利用した磁石フィルタを併設し、加工屑回収の効率化を図った。加工電極の加工位置制御は、パソコンによる制御システムを採用しており、ラッパ管などの素材に対して無駄なく試験片が採取できるようになっている。

本装置の導入により、従来は対応できなかった燃料被覆管からの平行部付き試験片やラッパ管からの小型試験片などを精度良く加工することが可能となり、今後の照射後材料試験のデータベース拡充に反映していく。

5. 再組立技術の開発

照射試験では、高照射量における燃料要素や材料の挙動を明らかにする際、照射途中での照射試験料の状態を調べる中間検査が重要なポイントの一つである。これまで燃材施設では、オフライン型でコンパートメントタイプの集合体であるB型燃



写真1 遠隔操作型精密試験片加工装置による試験片加工例

料集合体，炉心材料照射リグ（Core Materials Irradiation Rig：CMIR）などで照射した燃料要素，炉心材料などを中間検査の後，再び集合体に装荷する再組立技術を確立し，照射試料の「常陽」での継続照射を可能にしてきた⁷⁾。

「常陽」MK- では，従来の照射試験に加え新たな照射試験として照射しながら試料の温度制御ができるオンライン型照射装置による材料照射試験や試験用燃料要素をバンドルの状態で照射するC型照射燃料集合体の継続照射試験などを計画している。これら集合体の遠隔再組立技術は，コンパートメントタイプと異なり，遠隔操作による溶接技術や新たな試料取扱技術などが必要となる高度な開発テーマである。これら燃材施設における再組立技術開発について以下に述べる。

(1) MARICO 再組立技術

温度制御型材料照射装置（Material Testing Rig with Temperature Control：MARICO）は，高速炉における高性能な燃料被覆管材料として着目されているODS フェライト鋼などの材料試験体を「常陽」炉心での照射下における内圧クリープ破断試験や照射後のシャルピー試験などのための材料照射を行う目的に開発されたオンライン型の照射装置である。装置本体は，外径約15cm，全長約11mの長尺の装置であり，炉心部に位置し照射試験を行う試料部集合体内には，照射キャプセルを3個×

5段の計15個が配置する特殊な構造を有している。

MARICOの2号機には，既に1号機で照射した材料試験体など継続照射試料を組み込む予定であり，放射線を遮蔽し，かつ長尺の装置本体が扱える大型セルを有するFMF増設での再組立が必須となる。MARICO再組立は，組立途中の試料部集合体に，遠隔操作で継続照射試料を組み込み，エントランスノズル付き六角管を被せ溶接する作業である。MARICO再組立設備は，上記目的のため設計製作したもので，セル外でのモックアップ試験を積重ね整備した（図7）。

六角管の溶接については，プルトニウム燃料センターにおける手順・条件を調査・検討し，溶接時の電流値・速度などをパラメータに試行を繰り返し，溶け込み性能や外観検査を満足する溶接条件を確定した。また溶接による六角管の曲がりの発生状況を実測し，許容曲がり量以下となる六角管の溶接手順を確立した。

継続照射試料の組込作業など遠隔操作性の向上については，これまで培ってきた遠隔操作技術を反映し，セル内を模擬したマニプレータの操作によって照射試料の遠隔操作性や再組立設備の遠隔保守性を確認しながら改造を加え整備した。また本設備は，セル内に常設せずMARICO再組立や後に述べる外側ラッパ管遠隔交換時のような溶接機能を必要とする際にその都度セル内に搬入し据付

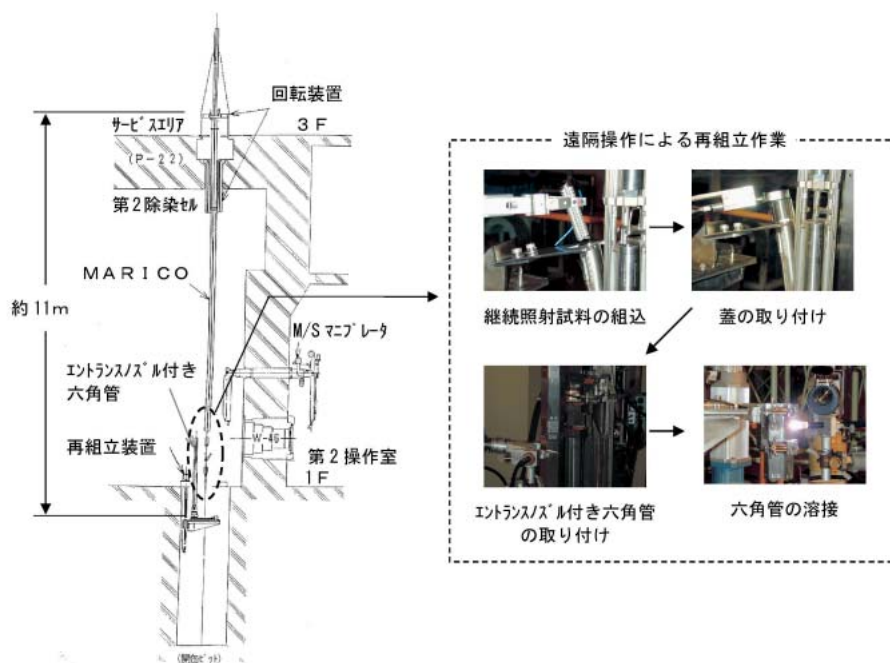


図7 MARICO再組立概略図

けるため、セルへの搬出入作業時の合理的な運搬治工具や保管のための容器などを整備した。

(2) インパイルクリープ試験片用内圧封入技術

高性能炉心材料の開発においては、使用中の燃料被覆管の内部圧力上昇によるクリープ破損に対する健全性を評価し、使用中の信頼性を確保する必要がある。照射中の内圧クリープ強度の評価は、内圧をパラメータとした内圧封入型クリープ試験片（以下、クリープ試験片という）を原子炉内に装荷し、照射中の破断時間を測定する方法で行われる。同一の照射リグには、内圧の異なるクリープ試験片を多数装荷するため、照射中に破断した試験片を同定することが困難であった。「常陽」MK- では、クリープ試験片にタグガス（Xe ガスやKr ガスの同位体組成を調整した指標ガス）を封入し、破断によって炉内に放出されたタグガスをレーザ共鳴イオン化質量分析法（RIMS）で分析し、破断試験片を同定する計画である。

これまで、このような試験片の製作は海外に頼りコストの面や供給安定性に課題があったが、タグガスを内封できる技術を開発し、装置の整備を行った。

本装置の概念を図8に示す。封入容器内に細孔付き内圧クリープ試験片をセットし、その周囲に

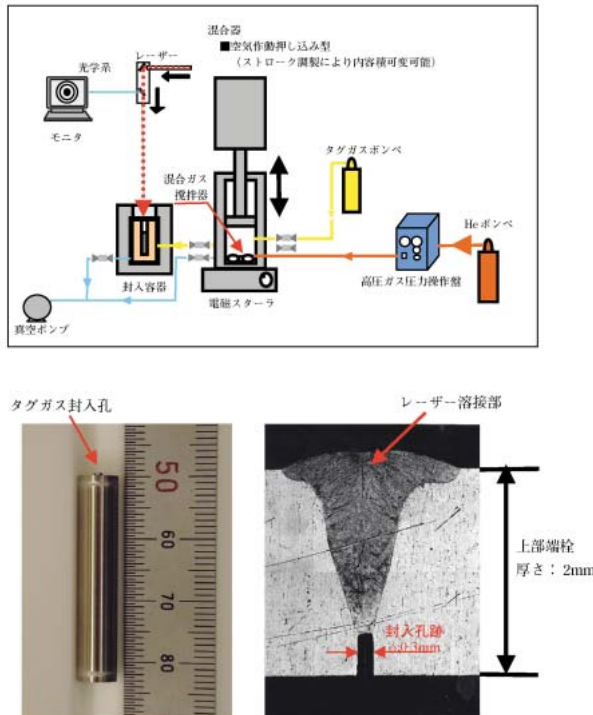


図8 インパイルクリープ試験片用内圧封入装置概念図

内封気体（タグガスとHeガスの混合ガス）を満たし、所定の圧力まで加圧した状態で細孔にレーザを当て試験片を溶封する。

タグガスは高価であり、可能な限りロスを無くすることが重要である。クリープ試験片に封入するタグガスの量はRIMSでの分析要求条件として常温常圧で約5ccを必要とする。高価なタグガスを有効に使用する観点から、クリープ試験片への封入は一定量のタグガスにHeガスを加圧媒体として用いて混合する攪拌混合及び押し込み機能を考案設置したことにより、タグガス消費量の抑制と混合精度の向上を図った。また、封入容器内への試験片ホルダーの採用や高圧ガス配管の細径化を図った。さらに、高圧ガス用バルブも封入容器と一体型とする等の工夫を凝らし、タグガス封入の際に生じるロスを極限まで減らした構造とした。

タグガス封入装置にて製作したクリープ試験片は、FMFのピンバンクチャー測定装置を用いて破裂させ、内封したガス圧力、混合割合を測定した結果、所定のガスが封入されており装置の機能・性能が確保されていることを確認した。

(3) 外側ラッパ管遠隔交換技術

C型照射燃料集合体C6Dの継続照射試験は、要素本数37本（太径・高密度・軸方向非均質）バンドルに高強度フェライト/マルテンサイト鋼を内側ラッパ管とした二重ラッパ管構造の燃料集合体で、高速炉燃料の高性能化を達成するための改良技術の高燃焼度炉心への適用性を実証することを目的に、目標燃焼度160GWd/tまで照射する計画である。この照射試験では、照射途中でSUS316相当鋼の外側ラッパ管の膨れが大きくなり、炉内での燃料集合体の取扱ができなくなるおそれがあり、照射途中で炉外に取り出し、外側ラッパ管を交換する作業が生じる。このためC型照射燃料集合体の外側ラッパ管を遠隔で交換する再組立技術を確立した。

外側ラッパ管の遠隔交換技術では、ラッパ管固定ネジの遠隔着脱とその廻り止めを目的とした遠隔スポット溶接技術の確立が必要である。また、ホットセル内での取扱に伴う集合体への放射能汚染防止にも留意が必要である。

現状のFMF増設第2試験セルは - 雰囲気であり、放射能汚染の可能性がない。また、溶接機能は、MARICO再組立設備にて整備が計画されている。これらの諸条件を踏まえ、C型照射燃

料集合体の外側ラッパ管交換は、FMF増設にて実施することとした。

ラッパ管固定ネジの遠隔着脱は、既存設備である集合体縦型試験装置を使用し、専用治具を用いて行う。まずラッパ管固定ネジの廻り止め溶接部をエンドミルで切削し、六角穴付き皿ビス（M10×7mm）を専用治具にて取り外す。次にラッパ管を引抜き、寸法測定など中間検査後新しいラッパ管を取り付ける。この際、ラッパ管の勘合部の詳細な寸法測定データを取得する。これらの手順は、集合体の炉外ナトリウム流動試験に用いた試験体を用いフルモックアップ試験にて確認した。

2003年9月現在、C型照射燃料集合体C6Dは、新しいラッパ管を実機試験体に取り付け、ネジ止め固定が終了している。今後、固定ネジの廻り止め点付け溶接を行い、「常陽」MK炉心での継続照射のため払い出す予定である（写真2）。

6. MA燃料製造及び分析技術の開発

AGFでは、環境負荷低減、資源有効利用などに対してその効果が有望視されている低除染TRU

燃料*製造の要素技術として、MA核種であるアメリカシウム（Am）を対象に、セル内においてAmを含有したMOX燃料の遠隔製造技術開発を進めている⁸⁾。

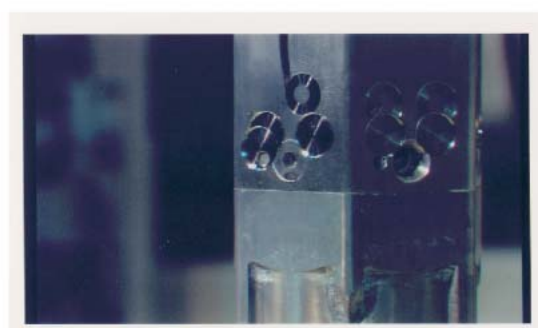
また、照射済燃料中のMA核種の分析技術開発を実施している。この研究開発は、照射済燃料中のMA核種の定量分析技術を確立することにより、MAの核変換特性、MA含有燃料の基礎物性及び照射挙動評価に反映させることを目的としている。

6.1 遠隔燃料製造設備の概要

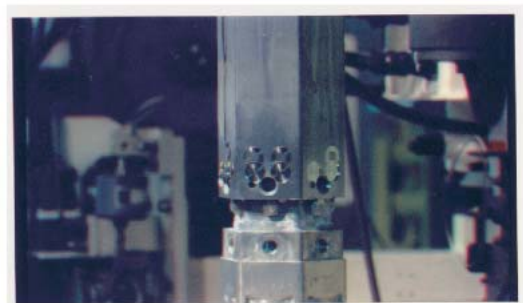
セル内に設けられている遠隔燃料製造設備は、1メートル厚のコンクリート遮へい壁で囲まれ気密性を有する3つのインナーボックス内（各、約2^W×2^D×2^Hm）及び1つのセル内に設置されている。当該設備の構成は、燃料ペレットを製造するためのペレット製造設備（粉末供給装置、粉碎混合機、油圧プレス成形機・焼結炉、センタレス研削装置など）及び製造したペレットなどをステンレス鋼製被覆管に充填・溶接密封をし、「常陽」



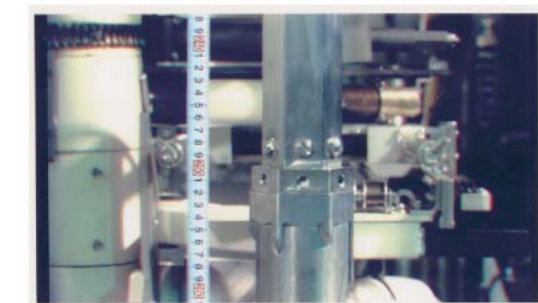
ラッパ管固定ネジ取り付け状態



固定ネジ廻り止め溶接切削



ラッパ管引き抜き状態



ラッパ管引き抜き後

写真2 外側ラッパ管遠隔交換状況

* 低除染TRU燃料：FPの除染係数の低い再処理製品を原料として製造される燃料。燃料にはPu、Uの他にAm、Np、Cm、FPなどが含まれる。

照射用の燃料要素（約1m長さ）に組上げるためのピン加工検査設備（ペレット充填装置、溶接装置、非破壊検査装置など）となっている。これら試験装置の運転は、マニプレータを用いてオペレータが遠隔により実施するが、操作性に対する工夫が各所に施されており、高線量のTRU核種、核分裂生成物などを含む燃料を全遠隔操作により製造することができ、世界でも類を見ない試験設備である。また製造したペレットの品質を確認するための分析設備も有しており、ここで得られた結果は、迅速にペレット製造条件に反映することが可能となっている。

(1) ペレット製造設備の機能及び構成

原料粉末を秤量した後、Amを含有したMOX粉末を機械混合法にて粉末調製し、ペレット成形体を高温にて焼き固め、焼結後のペレット寸法、密度検査までを行う。一連の設備は、原料粉末を扱うセル及びペレット焼結を行うセル並びにペレット検査を行うセルで構成される。これらの製造能力は、1バッチ当たり35～70g（ペレット数約15～30個）であり、小規模な燃料取扱い設備となっている。

(2) 燃料ピン加工検査設備の機能及び構成

製造した燃料ペレット及びスプリングなどの燃料要素構成部材を被覆管内に装填し、被覆管と端栓をTIG溶接にて溶封の後、最長1,000mmまでの燃料要素の溶接加工を遠隔操作にて行うことができる。また燃料要素の健全性を確認するための非破壊検査として、ITVカメラを使用しての溶接部の外観検査を行うとともに、溶接欠陥などの有無を確認するためのX線透過検査並びにヘリウムリーク検査が行える機能を有している。

6.2 遠隔燃料製造技術開発の現状

遠隔燃料製造設備に係る設備対応は、1995年頃から本格的に許認可、設備整備を進め、平成11年からはセル内に設置したペレット製造設備の各試験機器の性能を確認するための UO_2 取扱い試験を開始し、平成13年からはMOX及びAm含有MOX製造試験を順次進めている。これまでの試験から、ペレット製造設備の遠隔操作性に問題なく、小規模ながらセル内での遠隔燃料製造が技術的に可能であることを確認するとともに、約3%のAmが含有するMOXペレットを製造した。

現在、引き続き約5%Am含有MOXペレットの

製造技術成立性の確認などを目的に試験を行っている。

(1) Am含有MOXペレット遠隔製造試験

シュウ酸沈殿法にて製造された PuO_2 粉末及びADU法（硝酸ウランウム溶液にアンモニアを加え沈殿物を生成させ、焙焼還元を行う方法）で製造された天然 UO_2 粉末を使用してAmを約3%含有するPu富化度30%のMOXペレットを製造した。試験に供した PuO_2 粉末は、約30年前海外より購入したもので、Pu-241の崩壊によってAm-241が約9wt%蓄積されている。Am含有MOXペレットの製造フローは、 UO_2 ペレットの製造と基本的には同じであるが、粉末入手から期間が経過しているため、原料粉末中に含有する水分などを脱離するための熱処理の工程を追加している。

Am含有MOXペレット製造基本フローを図9に示す。熱処理は、 600×2 hrの加熱処理をAr-5% H_2 ガスの還元雰囲気で行った。また UO_2 試験の結果から造粒工程削除の見通しが得られたため、工程簡略法として造粒粉は作製せず、粉碎混合後の微粉末のまま直接ペレット成形した。粉碎混合、

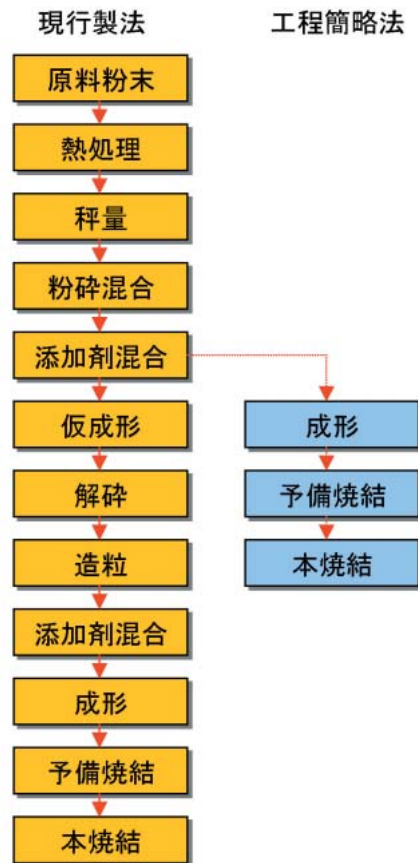


図9 遠隔ペレット製造基本フロー

成形，焼結などの条件はUO₂ペレットの製造結果を参考に設定した。

(2) 試験結果

Am含有MOXペレット遠隔製造試験に供した原料粉末の特性及び不純物を表5に，粉末のSEM像を写真3示す。UO₂粉末とPuO₂粉末とは粒子形態に違いが見られる。MOX粉末の母材となるUO₂粉末の粒子形態は丸みを帯びた粒子で構成され，またPuO₂粉末は，シュウ酸沈殿粉特有な板状の粒子形状を呈していた。

粉碎効果の違いによる成形体密度及び焼結体密度を表6に示す。これは粉碎混合時間に対するペレット密度の効果を確認するため，成形条件を全て一定にしてペレット成形体を作製したものである。粉碎混合時間の違いによって成形体密度に差が見られ，最も粉碎効果の低い条件である粉碎時間15minが6.07g/cc (54.7%T.D)であるのに対し，最も粉碎効果の高い粉碎時間720min (12hr)は6.40g/cc (57.7% T.D)であった。粉碎エネルギーの上昇に伴い成形体密度が上昇する結果が得られた。

このように成形条件一定でも成形体密度に変化が現れることから，明らかに粉碎効果によって粉末が微細化されていることを成形密度から確認できた。また，Ar-5%H₂ガス雰囲気下1,700 × 2hrで焼結したペレットは，成形体密度と同様に粉碎効果が高まるにつれ焼結密度も94% T.Dまで上昇し，粉碎混合8時間以上ではその上昇率は緩やか

× 5,000

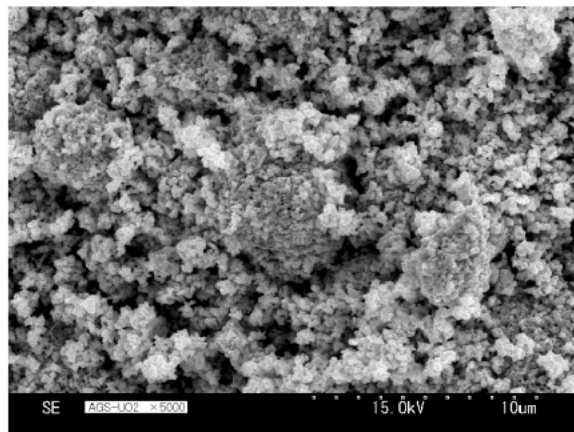
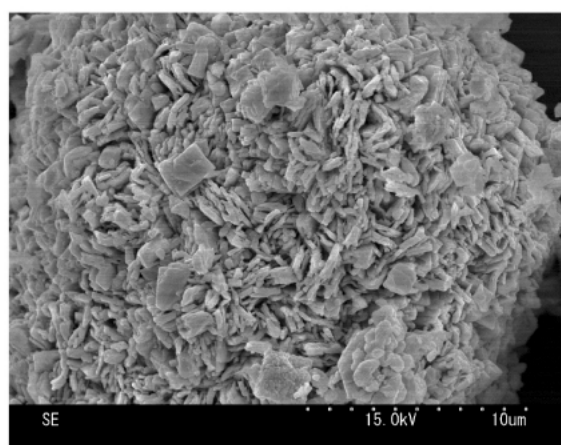
UO₂粉末 (ADU 粉末)PuO₂粉末 (シュウ酸沈殿粉末)

写真3 原料粉末のSEM像

表5 原料粉末の特性及び不純物量

供試材	粉末の種類	平均粒径 (μm)	比表面積 (m ² /g)	金属不純物量 (ppm)	その他不純物量 (ppm)
UO ₂ 粉末	ADU粉末 (天然ウラン)	0.5	3.6	<64.2	40
PuO ₂ 粉末	シュウ酸沈殿粉末	2.83	6.22	<810	73

ADU粉末：硝酸ウラニウム溶液にアンモニアを加え沈殿物を生成させ，焙焼還元により得た粉末
シュウ酸沈殿粉末：硝酸プルトニウム溶液に蓚酸を加え沈殿物を生成させ，焙焼して得た粉末

表6 粉碎効果の違いによるペレット密度

粉碎時間	15min	240min	480min	720min
粉碎エネルギー	2.08J/g	33.2J/g	66.5J/g	99.7J/g
成形体密度	6.07g/cc (54.7%T.D)	6.25g/cc (56.3%T.D)	6.31g/cc (56.8%T.D)	6.40g/cc (57.7%T.D)
焼結体密度	8.7g/cc (78%T.D)	9.8g/cc (88%T.D)	10.3g/cc (93%T.D)	10.4g/cc (94%T.D)

であることを確認した。約3%Am含有MOXペレットの外観及び横断面金相写真を写真4に示す。ペレット外表面には、カケ、割れ等はなく、また燃料組織は高密度であることを確認した。

6.3 照射済燃料中のMA分析技術の開発

本研究開発は、ネプツニウム(Np)、アメリシウム(Am)、キュリウム(Cm)について、標準試料を用いた基礎試験を行った後、照射済燃料へ適用する方針で実施した。

(1) 試験方法

セル内にて照射済MOX燃料を5mm長に切断し、専用フラスコに入れ、30mlの8モル硝酸中で約100×6時間加熱することにより溶解した。不溶解残さの残留をなくするため、フッ酸を加えている。放冷後、溶解液をフィルタでろ過、分取後、グローブボックス内で希釈した試料を基礎試験にて確認した手法にて各Np、Am、Cmの分析サンプルを作製した。測定は、マルチチャンネル波高分析システムを用い線線スペクトル分析を、また表面電離型質量分析装置を用いて同位体組成比の分析を行った。

(2) 分析結果及び成果

1) Np分析

^{243}Am から分離した ^{239}Np をNpの化学収率を評価するための内部標準試料(トレーサ法)として、イオン交換分離法を用いた ^{237}Np の分析技術を開発した。照射初期にNpを含まない照射済燃料及び照射済 ^{237}Np サンプルを分析し、それぞれ燃料中に生成する ^{237}Np の含有率、 ^{237}Np 含有率の燃焼度依存性を明らかにした。⁹⁾

2) Am分析

イオン交換分離法、沈殿法及び両者の組み合わせにより、照射済燃料中からAmを単独で抽出す

る条件を確立した。Amについては、 ^{243}Am を標準試料とする同位体希釈法により、定量技術を開発して照射済燃料中のAm同位体の定量、燃焼に伴う組成変化割合を明らかにすることを可能とした。また、分析結果から ^{243}Am の組成比が $^{242\text{m}}\text{Am}$ より大きいことから、未照射MOX燃料中に含まれている ^{242}Pu から至る ^{243}Am の生成が、 $^{242\text{m}}\text{Am}(\alpha, n, \gamma)$ 反応よりも優位であることが明らかとなった。⁹⁾

3) Cm分析

AmとCmの分離手法として硝酸-メタノール系陰イオン交換法をベースとした試料調製プロセスを考案し、照射済燃料中のCm同位体分析技術を開発した。図10に示すように燃焼度約60GWd/t以上において ^{247}Cm が極微量生成することを確認し、また燃焼度が約60~120GWd/tの範囲では、Cm同位体組成比はほぼ一定となることが分かった。本技術により、照射済燃料中のCm同位体分析、燃焼に伴う組成変化割合を明らかにすること

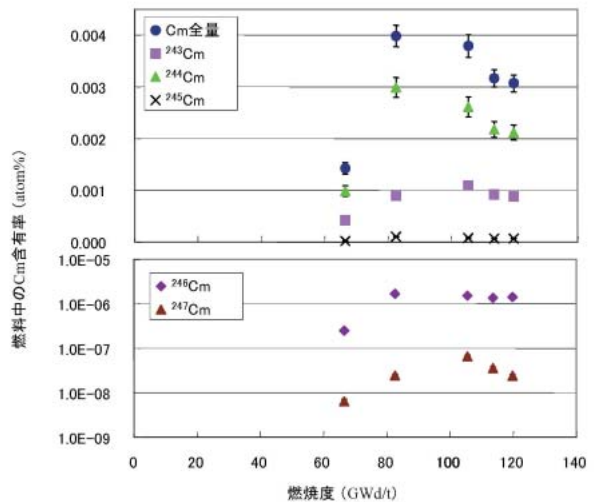


図10 Cm同位体組成分析結果とその燃焼による組成変化

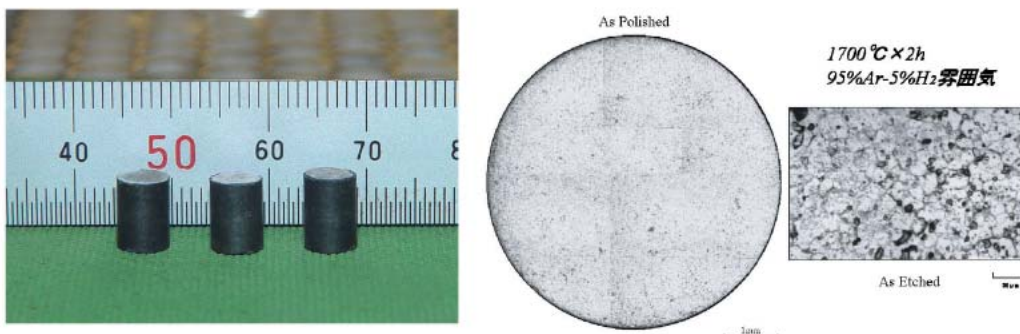


写真4 3%Am含有MOXペレットの外観及び金相写真

を可能とした。

7. おわりに

照射センターのホットラボでは、1971年からブルトニウムを含む燃料や燃料被覆管材料などの照射後試験を実施してきた。これまで遠隔操作技術、非破壊試験技術、物性測定技術などの照射後試験技術の開発に取り組んできた。さらに、「常陽」MK-での照射試験に向けてMA燃料製造・分析などの技術開発及び施設設備の整備を進めている。

今後、照射性能が大幅に向上した「常陽」MK-は、主に高速中性子照射場として提供され、MA-MOX燃料、酸化物分散強化型(ODS)フェライト鋼、金属燃料などの照射試験が具体的に計画されている。これらの「常陽」を用いた照射後試験データは、高速炉実用化の研究開発課題である経済性のさらなる向上を図るための燃料概念や新材料の実証データとなり、原子力材料や高性能燃料及び長寿命放射性元素の核変換技術開発などに役立てられる。

照射センターでは、これからも多様な試験条件に対応できる照射後試験技術の開発を継続的に進め、施設の安全運転を第一に照射後試験データの取得、照射試料の調製・供給を実施して行く予定である。

参考文献

- 1) 飛田公一, 染谷博之, 他: “照射センター利用ガイド「常陽」, FMF, AGF, MMF等の利用者のために”, 核燃料サイクル開発機構 大洗工学センター 照射施設運転管理センター, JNC TN 9450 2002-005, p.5-1~5-80 (2003)
- 2) 水野朋保, 鹿倉 栄: “燃料挙動解析コードCEDARの開発”, 動燃技報, No.76, p.37 (1990.12)
- 3) 永峯 剛, 勝山幸三, 他: “高エネルギー X線CTを利用した非破壊照射後試験技術の開発”, 原子力学会和文論文誌, Vol.1, No.2, p.209~219 (2002)
- 4) 瀬下一郎, 鶴飼重治, 他: “高速炉大型集合体のピン束変形挙動評価”, 動燃技報, No.79, p.75 (1991)
- 5) K. Katsuyama, T. Nagamine et al.: “Application of X-Ray Computer Tomography for Observing the Deflection and Displacement of Fuel Pins in an Assembly Irradiated in FBR”, Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.40, No.4, pp.220~226 (2003)
- 6) K. Yamamoto, T. Hirose et al.: “Melting Temperature and Thermal Conductivity of Irradiated Mixed Oxide Fuel”, Journal of Nuclear Materials, Vol.204, p.85-92 (1993)
- 7) 西野入賢治, 永峯 剛, 他: “照射後試験施設における「常陽」照射リグの継続照射技術の確立”, 動燃技報, No.74, p.80 (1990.6)
- 8) 核燃料サイクル開発機構, 日本原子力発電株式会社: “高速増殖炉サイクルの実用化戦略調査研究 フェーズ ” 2001年度成果報告書, JNC TN 1400 2002-001, p.227~252 (2002.8)
- 9) 小山真一: “照射済 MOX 燃料中の Np, Am 分析技術の確立”, サイクル機構技報, No.3, p.45~52 (1999.6)