

# 高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の解体手法の高度化

Establishment of the Disassembling Technique of the Driver Fuel Assembly Irradiated in JOYO

市川 正一 芳賀 広行 菊川 清秀 深作 博信 黒澤 洋一 勝山 幸三 前田 宏治 永峯 剛

Shoichi ICHIKAWA, Hiroyuki HAGA, Kiyohide KIKUKAWA, Hironobu FUKASAKU Yoichi KUROSAWA, Kozo KATSUYAMA, Koji MAEDA and Tsuyoshi NAGAMINE

大洗研究開発センター 燃料材料試験部

Fuels and Materials Department Oarai Research and Development Center

July 2011

**Japan Atomic Energy Agency** 

日本原子力研究開発機構



本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<a href="http://www.jaea.go.jp">http://www.jaea.go.jp</a>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課 7319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

#### 高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の解体手法の高度化

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター燃料材料試験部 市川 正一、芳賀 広行<sup>\*\*</sup>、菊川 清秀<sup>\*</sup>、深作 博信<sup>\*</sup>、黒澤 洋一<sup>\*</sup>、 勝山 幸三、前田 宏治、永峯 剛

(2011年5月9日受理)

高速実験炉「常陽」で照射された炉心燃料集合体の解体手法の高度化を図った。この解体手法の高度化により、燃料ピン下部端栓を切断せずに照射済み炉心燃料集合体から燃料ピンを取り出すことが可能になった。炉心燃料集合体を解体した後、取り出した燃料ピンを選定し、照射リグに組み込むことで再び「常陽」で照射することも可能となった。これにより高燃焼燃料及び高中性子照射材料に関する照射データの取得が可能となった。

大洗研究開発センター:〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

<sup>\*</sup> 技術開発協力員

<sup>\*</sup> 株式会社E&Eテクノサービス

Establishment of the Disassembling Technique of the Driver Fuel Assembly Irradiated in JOYO

Shoichi ICHIKAWA, Hiroyuki HAGA\*,
Kiyohide KIKUKAWA\*, Hironobu FUKASAKU\*, Yoichi KUROSAWA\*,
Kozo KATSUYAMA, Koji MAEDA and Tsuyoshi NAGAMINE

Fuels and Materials Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received May 9, 2011)

A disassembling technique for the JOYO driver fuel assembly has been established at the Fuel Monitoring Facility in JAEA. This technique made it possible to remove the fuel pins from the driver fuel assembly without fuel pin sectioning. After disassembling, some selected fuel pins can be reassembled into a new irradiation vehicle for continuous irradiation in JOYO. This technique allows the irradiation data of high burn-up fuel and high neutron dose material to be obtained.

Keywords: JOYO, Irradiation Test, Uranium and Plutonium Mixed Fuel for Fast Reactor, Post Irradiation Examination, Continuous Irradiation

<sup>\*</sup> Collaborating Engineer

<sup>\*</sup> Environment & Energy Techno Service Co.,Ltd.

### JAEA-Technology 2011-020

# 目次

1.	はじ	〕めに····································	· 1
2.	解体	×手法の高度化にかかる技術的課題	· 2
2.1	1 ;	炉心燃料集合体の構造	.2
2.2	2	照射燃料集合体の構造	.2
2.3	3	技術的課題	. 3
2	2.3.1	従来の解体手法	. 3
2	2.3.2	B型照射燃料集合体へ装荷する上での技術的課題	. 3
3.	炉心	·燃料集合体の解体手法の高度化	· 10
3.1		<b>解体手法の検討</b>	
3	3.1.1	解体条件	· 10
3	3.1.2	ノックバー溶接部の除去方法	· 10
3	3.1.3	ノックバー取り出し方法	10
3.2	2 角	羅体済み MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 残材を用いたモックアップ試験の実施	· 11
3	3.2.1	JS0003 の概要 ······	· 11
3	3.2.2	モックアップ試験結果	· 11
3.3	3 N	MK-Ⅱ炉心燃料集合体 PFD327 の解体への適用 ····································	· 11
3	3.3.1	PFD327 の概要	· 11
3	3.3.2	X 線 CT 検査······	·12
3	3.3.3	解体	· 12
3.4	1 N	MK-Ⅱ炉心燃料集合体 PFD327 解体結果からの改善点 ····································	· 13
3.5	5 N	MK-Ⅱ炉心燃料集合体 PFD327 の PIE の実施 ···································	· 13
4.		¥体手法の応用	
5.	まと	: Ø	.31
参考	<b>(文</b> 南	ĸt	.32

# Contents

1. Introduction ·····	······1	
2. Technical problem of the o	lisassembling technique 2	
2.1 Structure of the fuel ass	sembly ·····2	
2.2 Structure of the uninst	rumented fuel irradiation subassembly2	
	3	
2.3.1 Conventional disass	sembling ·······3	
2.3.2 Technical problem of	on loadings to UNIS-B ······3	
3. Establishment of the disas	sembling technique ······10	0
	sassembling technique ······10	
3.1.1 Disassembling cond	lition10	0
	g the knock-bar weld ······10	
3.1.3 Method of taking or	at the knock-bar10	0
3.2 Mock-up examination of	of the surplus material of MK-III driver fuel assembly JS0003	
	bled11	
	11	
3.2.2 Result of mock-up of	examination	1
3.3 Disassemble of MK-II	driver fuel assembly PFD327 ·····11	1
3.3.1 Outline of PFD327·	11	1
3.3.2 X-Ray Computer to	mography observation·····12	2
_		
3.4 Improvement in the fut	ure	3
3.5 Post irradiation examin	ation of PFE327 ······13	3
4. Application of this disasse	mbling technique ······28	8
5. Conclusion ·····	3	1
Acknowledgments		2
Reference ·····		2

### JAEA-Technology 2011-020

# 表一覧

表 1	炉心燃料集合体の仕様	•4
表 2	MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 の照射条件 ······	15
表 3	MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の照射条件	. 15
表 4	エンドミルの仕様、切削条件	·16
表 5	MK-Ⅱ炉心燃料集合体 PFD327 の照射後試験項目 ····································	·16
表 6	C 型照射燃料集合体 PFC060 の照射条件	. 29

### JAEA-Technology 2011-020

# 図一覧

図 1	「常陽」MK-Ⅱの炉心燃料集合体 ·······5
図 2	燃料ピン列の固定方法6
図 3	B型照射燃料集合体7
図 4	従来の炉心燃料集合体の解体手法8
図 5	B型照射燃料集合体(キャプセル型)への装荷方法の一例9
図 6	解体手順(ノックバー溶接部の除去、ノックバーの取り出し)17
図 7	解体済み MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 を用いたモックアップ試験フロー図18
図 8	解体済み MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 を用いたモックアップ試験概要19
図 9	解体済み MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 を用いたモックアップ試験結果20
図 10	モックアップ試験より得られた成果21
図 11	X線CTによるMK-II 炉心燃料集合体 PFD327 内部観察22
図 12	MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 解体の全体フロー図23
図 13	MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の解体
図 14	PFD327 と JS0003 残材の試料形状比較25
図 15	ノックバー押出し用スライドテーブル26
図 16	MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の集合体試験結果
図 17	MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の燃料ピン試験結果
図 18	C型照射燃料集合体30

#### 1. はじめに

高速実験炉「常陽」(以下、「常陽」と記す)使用済燃料貯蔵プールには342体の炉心燃料集合体が保管されており、この内、要素最高燃焼度50,000MWd/t未満の「常陽」MK-IIIで照射された炉心燃料集合体は93体にもなる。この一部を「常陽」MK-III炉心へ再装荷し、燃料、コストの低減を図る低燃焼度燃料の再装荷が計画されている。低燃焼燃料の再利用によって新燃料の製造費(約4,000万円/体)を節約することが期待されている。ただし、これら水中に長期貯蔵していた炉心燃料集合体を再利用する場合、許認可対応も重要な項目の一つである。炉心燃料集合体の燃料ピンを照射リグに組込み、再び照射試験に供することは従来不可能であったが、これを技術的に可能とすることにより長期水中貯蔵燃料等を照射して設計の妥当性を確認することができる。

さらに FBR サイクル実用化研究開発(Fast Reactor Cycle Technology Development Project; FaCT プロジェクト)で計画されている高燃焼度照射試験計画の中においても、照射済み燃料集合体から取り出した燃料ピンを照射リグに組み入れ「常陽」にて再照射することが、重要な照射オプションとして検討することが可能となる。

このため、照射済み炉心燃料集合体から任意の燃料ピンを抜き取り、抜き出した燃料ピンを照射試験用の リグである照射燃料集合体に組み込み、再び「常陽」へ再装荷して継続照射試験に供することができるよう、 照射済み炉心燃料集合体の解体手法について改良を行なった。

本報はその解体手法についてまとめたものである。

#### 2. 解体手法の高度化にかかる技術的課題

#### 2.1 炉心燃料集合体の構造

「常陽」の炉心燃料集合体は、燃料ピン 127 本をラッピングワイヤにより正三角形状に配列保持して、上部にハンドリングヘッド、下部にエントランスノズルを接合したラッパ管内に収納したものである。炉心燃料集合体の仕様を表 1 に示す。また、図 1 に「常陽」MK-II の炉心燃料集合体の概略図を示す。

燃料ピンは、図1に示すように、プルトニウム・ウラン混合酸化物ペレット及び二酸化ウランペレットを SUS316 相当ステンレス鋼製被覆管に挿入し、上部にプレナムスプリング及び反射体等を入れ、両端に SUS316 相当ステンレス鋼製端栓を溶接した密封構造のものであり、ヘリウムガスを封入している。

燃料ペレットは、円柱状であり、プルトニウム・ウラン混合酸化物粉末をプレス成型し、約94%理論密度になるように焼結されている。燃料ペレットと被覆管に適当なギャップを設け、また、燃料ピン上端部にガスプレナムを設けて、燃料ペレットから放出される核分裂生成ガスによる内圧、被覆管と燃料ペレットの熱膨張差、スウェリング等による寸法変化により被覆管や端栓溶接部に過大な応力が加わるのを防止している。

燃料ピンは、ラッパ管内に正三角形状に配列して収納し、その下部でノックバー等の支持部材により固定されている。図2に示すようにノックバーは燃料ピン下部端栓の貫通孔に上側ノックバー、下側ノックバーと2本、燃料ピン列毎に挿入され、その両端はTIG溶接でラッパ管組枠に強固に溶接されている。燐接する燃料ピンの間隔は、燃料ピンにスパイラル状に巻付けたSUS316相当ステンレス鋼製ラッピングワイヤで保持される。

ハンドリングへッドは、SUS316 ステンレス鋼製であり、ラッパ管の上部に溶接固定されている。下部反射体を保持したエントランスノズルは、SUS316 ステンレス鋼製であり、ラッパ管の下端に溶接固定されている。ハンドリングへッドとラッパ管には、炉心での隣接する集合体との間隔を保持するためのスペーサパッドが付けられている。

#### 2.2 照射燃料集合体の構造

「常陽」の照射燃料集合体は、炉心燃料集合体、制御棒、反射体等とともに照射用炉心を構成する炉心構成要素の一つであり、照射試験を実施するにあたり照射目的や照射条件に合わせて A 型照射燃料集合体 (UNIS-A: Uninstrumented Fuel Irradiation Subassembly Type-A)、B 型照射燃料集合体 (UNIS-B: Uninstrumented Fuel Irradiation Subassembly Type-B)、C 型照射燃料集合体 (UNIS-C: Uninstrumented Fuel Irradiation Subassembly Type-C) 及び D 型照射燃料集合体 (UNIS-D: Uninstrumented Fuel Irradiation Subassembly Type-D) の 4 種類がある。外形は炉心構成要素 (炉心燃料集合体や反射体) と同じで、「常陽」 炉心内での照射位置は任意である。

照射済み燃料集合体から取り出した燃料ピンを「常陽」にて再照射するにあたっては照射燃料集合体に組み入れる必要がある。使用する照射燃料集合体のタイプとしてはB型照射燃料集合体の使用が有力であると考えられる。図3にB型照射燃料集合体を示す。B型照射燃料集合体は、主に試験用燃料ピンの継続照射試験に使用するもので、照射試験途中に中間検査を実施し、試験燃料ピンの健全性を評価した後、ホットセル内で再組立を行い、原子炉へ再装荷ができるコンパートメントタイプの照射装置である。また、各コンパートメント毎に冷却材の流量を任意に設定できるので、同一照射条件下でのパラメトリックな試験が可能となっている。さらに、再組立が容易なグリッドタイプのコンパートメントも実用化されている。

このB型照射燃料集合体を用いて照射済みの燃料ピンの照射試験を実現するためには、2.3.2項で後述する理由により照射済み燃料集合体から燃料ピンを原状のまま取り出す必要がある。

#### 2. 3 技術的課題

#### 2. 3. 1 従来の解体手法

図4に照射燃料集合体試験施設 (FMF: Fuels Monitoring Facility) のホットセルにて通常実施している照射 済み炉心燃料集合体の従来の解体手法を示す。

炉心燃料集合体はエンドミルにてラッパ管を6面、順次切削される。切削位置は上下ラッパ管の組枠部である。切削後、上側のラッパ管が引抜かれる。燃料ピンは、列毎に順次バンドソーにて下部端栓部が切断される。燃料ピン列は、脱落防止のため燃料ピン列上部を保持された状態で切断され、炉心燃料集合体から取り出される。切断面はラッパ管組枠の上端から約5mm下である。図4中の写真(「常陽」MK-IIの炉心燃料集合体 PFD549)にあるように燃料ピンの下部端栓の一部(下部端栓下端から約30mm)が下側のラッパ管内にノックバーとともに残る。

なお、従来の解体手法では1列の燃料ピン列の解体を完了するのに約半日を必要とし、全ての解体工程に 係る日数は約7日間を要する。

#### 2. 3. 2 B型照射燃料集合体へ装荷する上での技術的課題

図5にB型照射燃料集合体への燃料ピンの装荷方法を示す。用いられるB型照射燃料集合体は、照射中に燃料ピンが破損した場合を考慮して、キャプセルタイプを用いる案が有力である。燃料ピンは、シュラウド管に充填され、更にキャプセル、コンパートメントの順に充填した後、B型照射燃料集合体へ装荷される。燃料ピンをシュラウド管に充填する際、燃料ピン下部端栓にあるノックバー貫通孔を利用して燃料要素支持バネで燃料ピンは固定される。

従って炉心燃料集合体の解体時に下部端栓を切断された状態の燃料ピンをB型照射燃料集合体へ装荷するためには、照射燃料集合体の構造設計の変更なしに燃料ピンの継続照射は不可能である。

このため、燃料ピンの下部端栓部を切断せず残すことで、照射燃料集合体の構造設計の変更せずに照射済み燃料ピンの再照射試験に対応できるよう、新たな炉心燃料集合体の解体手法の開発に取り組んだ。

# 表1 炉心燃料集合体の仕様(1)

<u> </u>	
全長	約 2,970 mm
ラッパ管パッド部・外対面寸法	約 81.2 mm
燃料要素本数	127 本
燃料要素外径	約 5.5 mm
燃料	プルトニウム・ウラン混合酸化物
プルトニウム富化度	30 w/o 以下
ウラン濃縮度(J2)	約 18 w/o
燃料装荷量(プルトニウム)	約 220 kg
(ウラン235)	約 90 kg
最高燃焼度(要素平均)	75,000 MWd/t
燃料単位長出力(定格最大)	約 400 W/cm
被覆管材料	SUS 316 相当ステンレス鋼
被覆管最高温度(肉厚平均)	650 °C

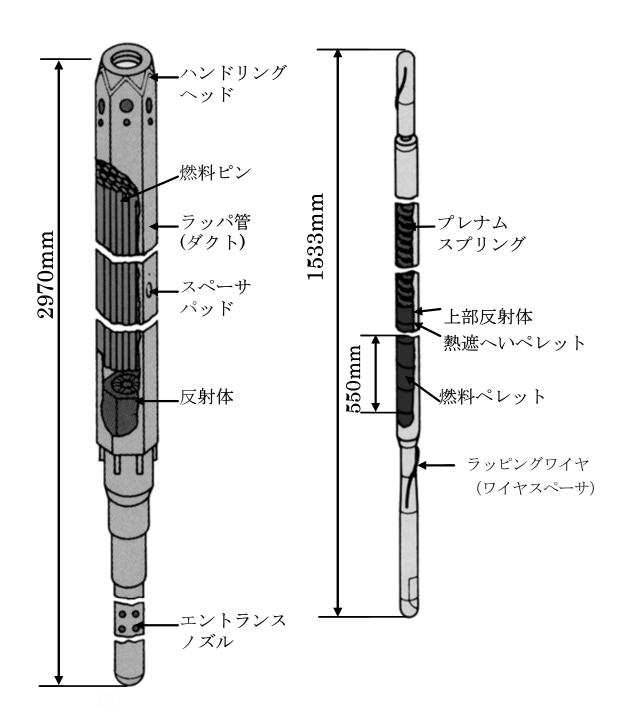


図1「常陽」MK-IIの炉心燃料集合体

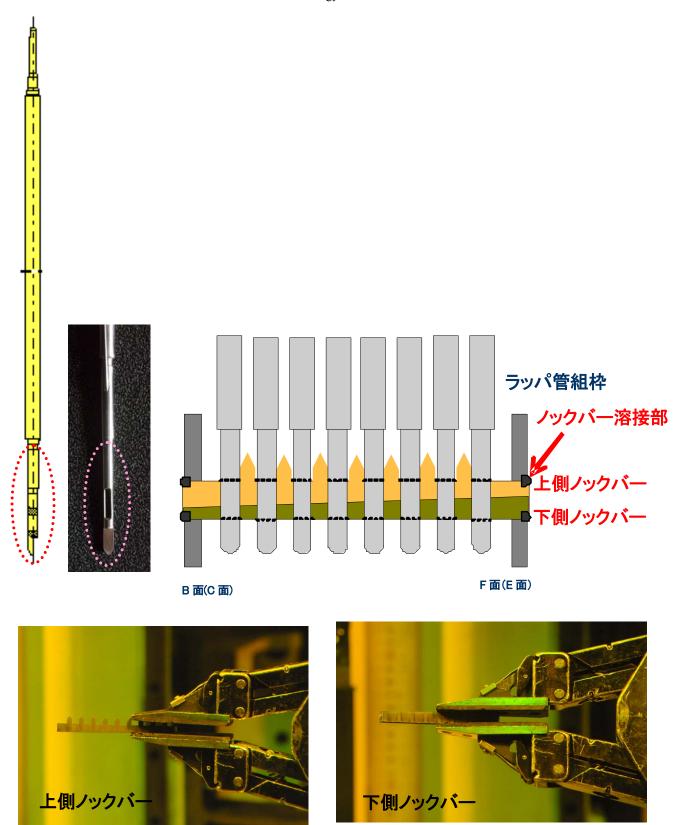


図 2 燃料ピン列の固定方法

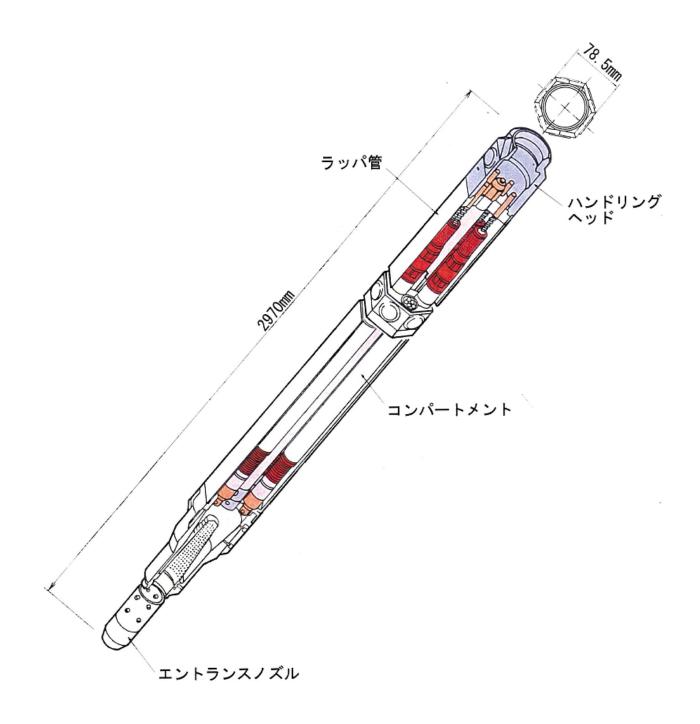
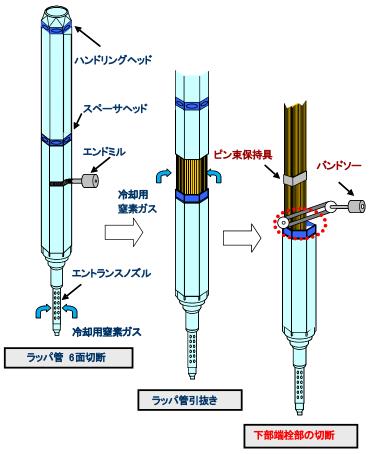


図3 B型照射燃料集合体(1)



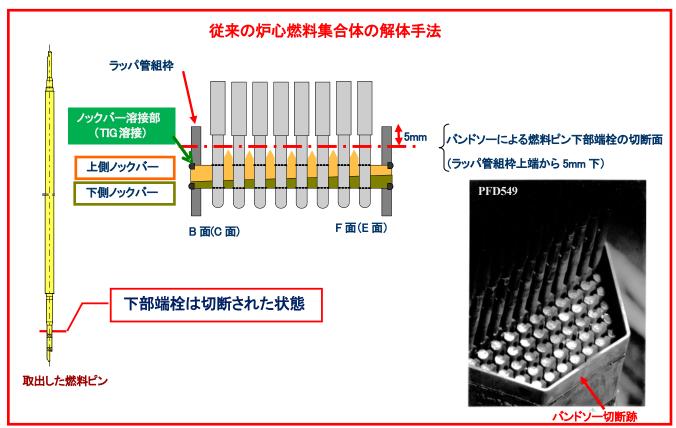


図 4 従来の炉心燃料集合体の解体手法

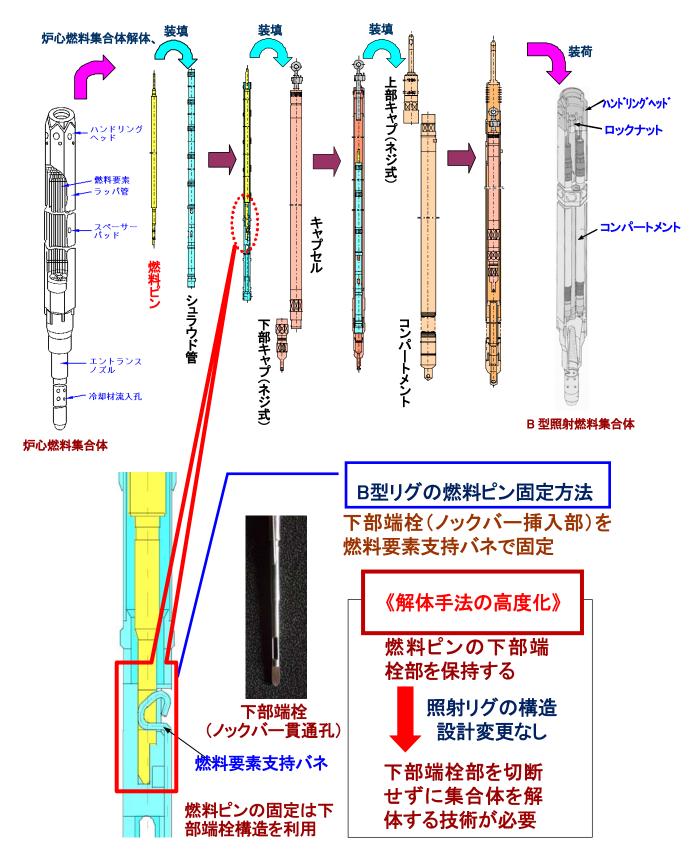


図 5 B 型照射燃料集合体(キャプセル型)への装荷方法の一例

#### 3. 炉心燃料集合体の解体手法の高度化

#### 3. 1 解体手法の検討

#### 3. 1. 1 解体条件

新たな解体手法は、FMF ホットセル内に設置している既存の解体装置を用いることを前提とし、既存装置では対応困難な作業ステップが必要となった場合のみ極力単純かつ十分な遠隔操作性を有する治具で対応することとした。

図4に示すようにノックバーは、燃料ピンの列毎に下部端栓の貫通孔に上側ノックバー、下側ノックバーと2本挿入されている。上側ノックバーの形状は上側が一定間隔で山切りとなっており、各列の燃料ピン間に隙間を設け、Na流路が確保できるようになっている。上側ノックバー、下側ノックバーの対面にはテーパー(1°±10°)が切ってあり、上側ノックバーを挿入して燃料ピンの位置決めをした後、下側ノックバーを挿入して上側ノックバーを押し上げることで固定をしている。また、各ノックバーの両端においては上側ノックバーの上側、下側ノックバーの下側をラッパ管組枠にTIG溶接し、強固に固定されている。

検討の結果、新たな解体手法は、ノックバー溶接部の除去としてラッパ管組枠をエンドミルで燃料ピンー列毎に切削する。ノックバー溶接部を除去した後、新規に製作したノックバー押出し治具で下側ノックバー、上側ノックバーの順で押し出し自由になった燃料ピン列を取り出すという手順で進めることとした。

#### 3.1.2 ノックバー溶接部の除去方法

図6の上段にノックバー溶接部の除去手順を示す。ノックバー溶接部の除去方法の検討の結果、エンドミルでラッパ管組枠のノックバー溶接部を一列毎に切削を行なうものとした。切削は、ラッパ管対面同士を交互に切削し、ノックバーが押し出される側(ラッパ管 F 面又は E 面)のノックバー溶接部を除去した後、押し出す側(ラッパ管 B 面又は C 面)のノックバー溶接部の除去を行なうものとした。溶接深さが不明であるため、各面での切削量(エンドミルの送り量)は少量とし、溶接状況においてはノックバー溶接部が除去されるまで本作業を繰り返すものとした。

本作業では、特に燃料ピンとエンドミルとの接触の可能性について慎重に検討を進めた。厚さ 1.3mm の組枠を極力残しつつノックバー溶接部を少しずつ切削し、除去するものとした。しかし、ノックバー溶接部の溶け込み深さが深く、3.1.3 項に示すノックバーの取り出し作業に支障をきたす場合には、ラッパ管組枠を完全に除去するまで切削をするものとした。図 6 中に示すように燃料ピンと組枠との間にある 0.18mm の隙間があることから、その際の切削量をこれ以下に制御することで燃料ピン下部端栓への傷防止を図るようにした。

#### 3. 1. 3 ノックバー取り出し方法

図 6 の下段にノックバーの取り出しの手順を示す。ノックバー取り出し方法の検討の結果、本作業では、ノックバー溶接部を除去した後に新たに製作したノックバー押出し冶具でノックバー(上側ノックバー、下側ノックバー)をラッパ管 B 面(又は C 面)から押し出し、ラッパ管 F 面(又は E 面)からマニプレータで引抜きを行なうものとした。ノックバーの取り出し順序は、下側ノックバー、上側ノックバーの順で行なうものとした。この間、燃料ピン列は、上部を保持具で吊り上げた状態にすることで、これにより燃料ピン列の自重でノックバーが取り出しにくくなることを防止するとともに、ノックバーを取り出した際に燃料ピン列が落下するのを防止するものとした。下側ノックバーを取り除いた後の上側ノックバー取り出し作業で

は、3.1.1 項で述べたように上側ノックバーは下側ノックバーで押し上げられた状態にあるため、一旦上側ノックバーを燃料ピン下部端栓の貫通孔の位置まで下げる必要があった。上側ノックバーの自重により貫通孔の位置まで下がれば良いが、上側ノックバーの幅( $1.8^{\circ}_{-0.1}$  mm)と貫通孔の幅(1.8mm)のクリアランスは殆ど無いことから、ノックバー押し出し冶具を用いてラッパ管 B 面(又は C 面)、F 面(又は E 面)を交互に片方づつ下げる手順を採用した。この手順においては、仮に上側ノックバーが引っかかり下降ができなかった場合を想定し、組枠を完全に切削することも考慮に入れた。

なお、ノックバー押し出し冶具の形状に関しては、ラッパ管 B 面(又は C 面)側の下側ノックバーの断面 積は非常に小さいこと、また、上側ノックバーの下降作業を考慮して、先端をピン形状にしたものを採用し た。ピンの材質はステンレス製とした。

#### 3. 2 解体済み MK-Ⅲ炉心燃料集合体 JS0003 残材を用いたモックアップ試験の実施

#### 3. 2. 1 JS0003 の概要

新たに考案した手法は、これまでの手法で解体した「常陽」MK-III 炉心燃料集合体 JS0003 の残材(E/N:エントランスノズル部)を用いてモックアップ試験を実施した。表 2 に JS0003 の照射条件を示す。JS0003 は、MK-III 第 32 サイクルから MK-III 第 4 サイクルの炉心位置 4F1 にて、また、MK-III 第 5 サイクルから MK-III 第 6'サイクルの炉心位置 5A4 にて照射に供し、燃焼度(集合体平均)が 77,500MWd/t、照射量が  $1.08 \times 10^{23}$ n/cm²(E $\geq 0.1$ MeV)の炉心燃料集合体である。JS0003 は既に従来の解体手法で解体済であり、ラッパ管組枠内には上側ノックバー、下側ノックバーに貫かれた状態の下部端栓の一部が残るのみとなっている。

#### 3. 2. 2 モックアップ試験結果

図7及び8にモックアップ試験の作業フロー図及び概要を示す。事前に想定されるリスク及び問題点を洗い出した上で、1回あたりの切削量は0.2~0.3mm 程度を基本とし、実際の状況を考慮して決定した。ノックバーが抜けない場合は、組枠が貫通するまで繰り返し切削を行なうものとした。図9、10にモックアップ試験結果及びまとめを示す。エンドミルでの切削、ノックバーの引抜きは全13列中、第1列から順に第7列(中心列)まで実施した。モックアップ試験の結果、組枠(肉厚:1.3mm)に対して第1列から第6列までは0.6mm、中心列である第7列は0.8mm 組枠を切削し、組枠の肉厚をそれぞれ0.7mm、0.5mm 残した状態でノックバーを引抜くことができた。この時、ノックバーと組枠の境界部が目視で識別できる状態がノックバーを押出せる(又は引抜ける)目安となっている。ノックバー溶接部の溶け込み深さは、炉心燃料集合体製造時の溶接状態が不明であるが、今回の切削量の結果から最大でも0.8mmと推定される。このため組枠の肉厚が少なくとも0.5mm 残った状態であることから、エンドミルにより切削時に燃料ピンへの接触し破損させる可能性は低いことが確認された。

また、ノックバーの押出し作業については、マニプレータで軽く押す程度の力で十分であり、押出し冶具の機能、取扱い性について問題が無いことが確認された。

これら本モックアップ試験で得られた情報を基に、解体方法等の再検討を行い、実機材への適用に臨んだ。

#### 3. 3 MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の解体への適用

#### 3. 3. 1 PFD327の概要

新たに考案した手法を「低燃焼度燃料の再装荷計画」の許認可対応用データ取得を目的とした「常陽」MK-II 炉心集合体 PFD327 の解体に適用した。表 3 に PFD327 の照射条件を示す。PFD327 は、MK-II 第 18 サイ

クルから MK-II 第 20'サイクルの炉心位置 2C1 にて、また、MK-II 第 21 サイクルから MK-II 第 24'サイクルの炉心位置 4A3 にて照射に供し、燃焼度(集合体平均)が 60,900MWd/t、照射量が  $8.83 \times 10^{22}$ n/cm² (E  $\geq 0.1$ MeV) の炉心燃料集合体である。PFD327 は「常陽」使用済み燃料貯蔵プールにて約 17 年間水中貯蔵された炉心集合体であることから、集合体及び燃料ピンの照射後試験(PIE: Post Irradiation Examination)から得られるデータは、今後の「低燃焼度燃料の再装荷計画」において非常に重要なものとなる。

#### 3. 3. 2 X線CT検査

図 11 に X 線 CT 検査による PFD327 のノックバー付近の縦断面観察 (撮像範囲:集合体下端から 1249.6mm ~1267.6mm)、横断面観察結果を示す。縦断面観察結果及び横断面観察結果からは、全 13 列において下部端栓、ノックバーに照射による変形等が無いことが確認された。また、ラッパ管組枠と燃料ピン下部端栓との間に隙間 (図面上の値は 0.18mm) が確保されていることも確認された。

#### 3. 3. 3 解体

表 4 にエンドミルの仕様、切削条件を示す。エンドミルの主な仕様に関して、刃材質は炭素鋼であり、径は $\phi$  14mm、刃数は 2 枚である。切削位置は炉心燃料集合体下端より 1,256.7mm とし、モックアップ試験結果を参考に切削量は Max 0.3mm/回とし、送り速度は 3mm/sec としている。

図 12 に PFD327 集合体解体全体フロー図を示す。中心列(第 7 列)の切削は、B 面-C 面、E 面-F 面の各コーナー部の切削があるので中心列以外の列(第 1 列~第 6 列、第 8 列~第 13 列)と手順が若干異なる。中心列はエンドミルとラッパ管組枠との平行合わせの作業がない。図 12 中の「列解体」と記した箇所が今回、新たに考案した解体手法である。それ以外の部分は従来の解体手法を用いている。2.3.1 項に示した従来の解体手法で示した通りラッパ管は、6 面あるラッパ管組枠をエンドミルにて順次切削し、切断したラッパ管の引抜を行なった。

図13の上段に燃料ピン第1列目のノックバー溶接部の切削状況を示す。この時の切削量はJS0003 残材を用いたモックアップ試験結果から推定した最大溶接深さ 0.6mm(中心列以外の列の場合)まで達している。しかしながら、エンドミル切削痕を見て分かるように、エンドミルでの切削によりバリが多く発生し、目視にてノックバーと組枠の境界部の判別が困難となっている。モックアップ試験では溶接深さまで切削量が達した場合、ノックバーと組枠の境界部の視認ができていた。また、この視認可能な状態がノックバー取出し作業に移る目安となっていた。PFD327 の切削におけるバリの発生量はJS0003 残材を用いたモックアップ試験時よりも顕著となっている。これは第1列以外の他の列の切削に関しても共通の事象であった。今回の切削量から溶接深さには達していると推定されることから、金ヤスリを用いてエンドミル切削痕を研磨し、ノックバーと組枠の境界部が見える状態にまで仕上げ、ノックバー押出し治具を用いた作業に移った。

しかしながら、PFD327 解体の大部分の燃料ピン列において、モックアップ試験時の切削量(組枠の肉厚1.3mmに対して中心列では Max0.8mm、中心列以外では Max0.6mm)では下側ノックバーの取り出し、上側ノックバーの下降、取り出しが困難な状態が生じた。そこでラッパ管組枠の切削量を更に増やす方針に切り替え、ノックバー押出し冶具による取り出し作業を継続することにした。図 13 の下段にノックバーの取り出し状況を示す。切削量を段階的(0.4、0.3、0.3、0.1mm)に増やし、その都度、押出しをする作業を繰り返した。エンドミルの操作に関しては、ラッパ管組枠の肉厚が薄くなっていることから、下部端栓へ傷を付けることが無いよう細心の注意を払い切削を続け、ノックバー溶接部の除去を図った。その結果、4 列目まではラッパ管組枠を 1mm 以上、5 列目以降は完全に切削することでノックバーの押出しが可能となった。これ

により全13列、127本の燃料ピンは、下部端栓を切断することなく全て集合体から取り出すことができた。 ピン列取り出しの工程は、1列当たり約2日間を要し、計約26日間を必要とした。

#### 3. 4 MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 解体結果からの改善点

MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の解体では、解体済みの MK-III 炉心燃料集合体 JS0003 残材のモックアップ 試験時と比較して切削量の制御が困難であり、また、結果として切削量もが多くなってしまった。大部分の 燃料ピン列ではラッパ管組枠を完全に除去するまで切削している。また、モックアップ時に比べバリが多く 発生し、切削面が粗くなったことで組枠の境界部の不鮮明な状態が生じた。このバリの除去も含め、ノック バーの取り出し作業自体もモックアップ試験時と比べて予想以上の労力を要した。

PFD327 の切削では、集合体の振動が観察されており、この振動によりラッパ管面に対して均一な切削が しにくく、エンドミル送り量と実際の切削量に差が生じ、その結果、切削量の制御が困難ものと推定される。 本作業では、切削の度にラッパ管面とエンドミルの平行合わせが必要となり作業効率も低下している。

また、JS0003 に比べ PFD327 の切削量が多いことに関しては、炉心燃料集合体製造時の溶接具合のバラツキ (ノックバー溶接部の溶け込み深さの相違) によるものが一つの原因と考えられるが、その他にも先に挙げた切削時の振動による影響も考えられる。

図 14 に PFD327 と JS0003 残材の試料形状の違いを示す。PFD327 は全長 2,970mm あるのに対して、モックアップ試験で使用した JS0003 残材は従来の解体手法により既に解体済みであるため、試料の全長は下端から約 1,200mm と PFD327 の全長の約半分以下となっている。試料の固定は、両方ともエントランスノズル部をバイスで把時されている。PFD327 の切削時に振動が生じる原因としては、JS0003 残材に比べ重心が高く、エンドミルの回転振動に集合体が共振したものと思われる。

また、ノックバーの取り出しに手間取ったことに関しては、集合体の振動により切削量が増え、結果として組枠を完全に除去してしまったことにより燃料ピン束がフリーの状態になってしまい、ノックバー押出し 治具による押し出し力が分散したしまったことなどが主な原因と思われる。また、切削時の振動によって生 じたバリがノックバーと組枠の隙間に入り込みこんだ影響も考えられる。

今後は振動軽減のため、現状ではエントランスノズル部をバイスで把時しているが、例えば把時位置をラッパ管側で固定方法などを検討する。また、切削中の振動で生じたバリの除去効率を上げるためマイクログラインダー等の工具類を整備して対処する。ノックバー押出し冶具に関しても改良を図る。図 15 に考案中のノックバー押し出し冶具一式(ノックバー押出し用スライドデーブル)の一例を示す。これまでのノックバー治具はマニプレータで直接把握し、ピン状のノックバー押出し冶具のノックバーに押し当てていたが、当該冶具一式ではノックバー押し出し冶具をテーブルに固定し、ガイドに沿ってノックバー押出し冶具をスライドさせる機構となっている。これによりノックバー押し出し冶具の先端がラッパ管面に対して垂直、且つ、均等に押し出し力がかかるようにしている。また、今回のように組枠を完全に除去した際のフリーになった燃料ピン束の固定方法についても検討する。

#### 3. 5 MK-Ⅱ炉心燃料集合体 PFD327 の PIE の実施

PFD327 から取り出した燃料ピンは、一部を B 型照射燃料集合体への継続照射用燃料ピンとして供するとともに、長期水中貯蔵集合体及び燃料ピンの健全性確認として表 5 に示す PIE に供した。PIE 項目は、集合体試験(外観検査、集合体寸法検査、X 線 CT 検査)、燃料ピン試験(ピン列外観検査、ピン寸法測定試験、詳細外観検査、ソスキャン、パンクチャー、ピン重量)及び破壊試験である。

#### JAEA-Technology 2011-020

図 16 に集合体試験の PIE 結果、図 17 に燃料ピンの PIE 結果を示す。いずれの PIE 結果においても他の「常陽」 MK-II 炉心集合体と比べ特異な変化は観察されておらず、PFD327 の長期水中貯蔵による影響は見られなかった。なお、燃料ピンの PIE 項目の内ピン重量測定に関しては、従来の燃料ピンの様に下部端栓を切断された状態での測定ではないため、直接照射前後で比較出来ることから、測定における不確かさが $\pm 0.7g$  から $\pm 0.4g$  へと小さくなっている。金相試験や材料試験(引張試験、急速加熱バースト試験)の破壊試験に関しては今後実施予定である。

# 表2 MK-Ⅲ炉心燃料集合体JS0003の照射条件

炉心装荷日	H 9.10. 8
炉心取出日	H 20.5.19
EFPD [日]	136.774
照射サイクル(装荷位置)	MK-Ⅱ第32サイクル~MK-Ⅲ第4サイクル(4F1)
	MK-Ⅲ第5サイクル~MK-Ⅲ第6'サイクル(5A4)
燃焼度[MWd/t] 集合体平均	7.75 × 10 <sup>4</sup>
最高	$9.49 \times 10^4$
照射量[n/cm²] E≧0.1MeV	$1.08 \times 10^{23}$

# 表3 MK-II 炉心燃料集合体PFD327の照射条件

炉心装荷日	H 1. 4.30
炉心取出日	H 4. 7.17
EFPD [日]	420.268
照射サイクル(装荷位置)	MK-Ⅱ第18サイクル~第20'サイクル(2C1),
	MK-Ⅱ 第21サイクル~第24'サイクル(4A3)
燃焼度[MWd/t] 集合体平均	$6.09 \times 10^4$
最高	$7.83 \times 10^4$
照射量[n/cm²] E≧0.1MeV	$8.83 \times 10^{22}$

# 表4 エンドミルの仕様、切削条件

材質: 炭素鋼

工 概略寸法: W830mm×L790mm×H340mm

ン 概略重量: 約180Kg

ミ 切削刃: エンドミル 径: φ14mm

ル サ 長さ: 90mm

仕 <sup>長さ: 90</sup> 様 刃数: 2

回転速度: 240rpm(インバータ制御により可変)

切 切削位置: 集合体下端より1,257.6mm

削 条 切削量: Max0.3mm/回

件 送り速度: 3mm/sec

# 表5 MK-II 炉心燃料集合体PFD327の照射後試験項目

■集合体試験 外観検査

集合体寸法検査

X線CT

■燃料ピン試験 ピン列外観検査

ピン寸法測定試験

詳細外観検査

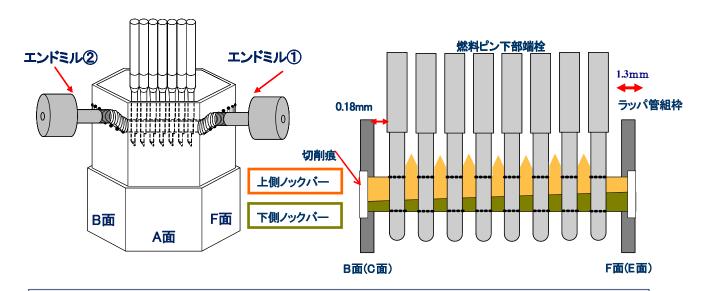
アスキャン

パンクチャー

ピン重量

**■**破壊試験 金相試験

材料試験(引張試験、急速加熱バースト試験)



# ノックバー溶接部の除去

- ①ノックバー溶接部の除去において、燃料ピンの保護、作業効率の観点から組枠の肉厚 (端栓側)をできるだけ残した状態で溶接部の除去
- ②ノックバー溶接部の状態によっては組枠の完全除去を想定 ⇒クリアランス(0.18 mm)が残ることにより、下部端栓表面はエンドミルと接触しない。

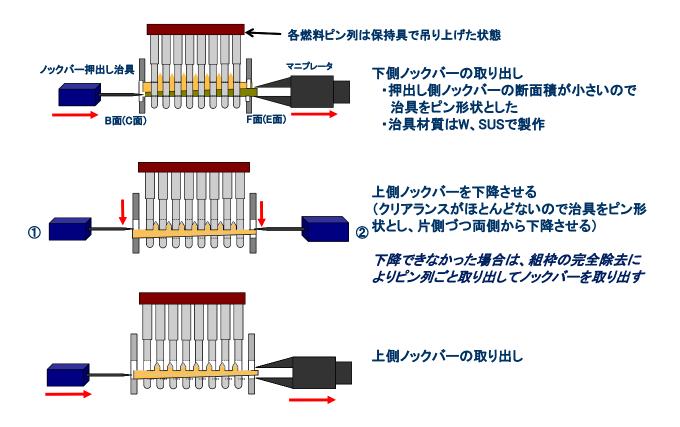


図 6 解体手順(ノックバー溶接部の除去、ノックバーの取り出し)

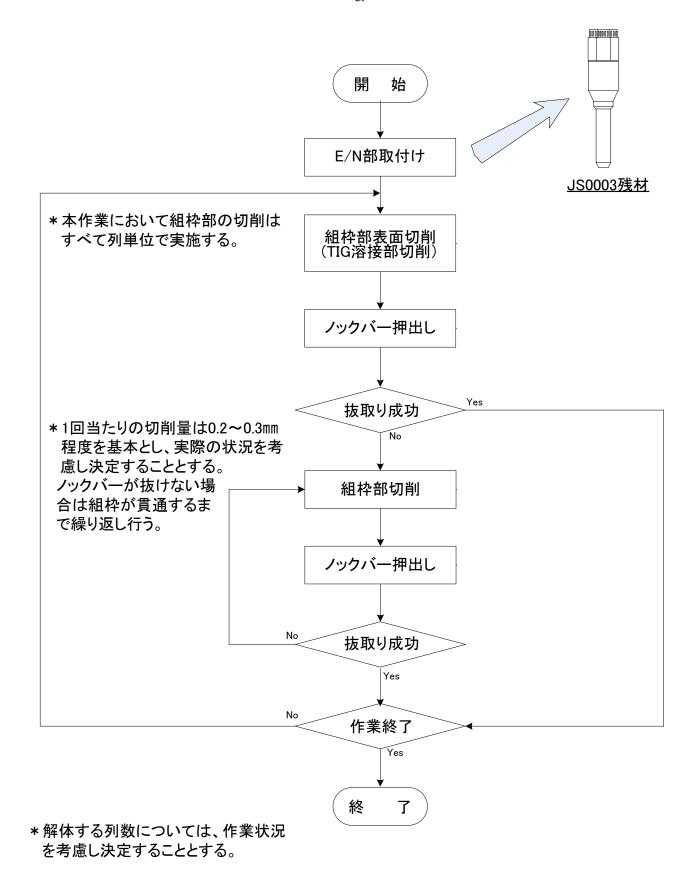


図7 解体済み MK-III炉心燃料集合体 JS0003 を用いたモックアップ試験フロ一図

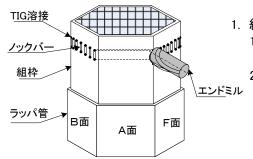
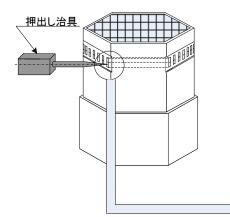


図-2 組枠部表面切削

#### 1. 組枠部表面切削

- 1) F面の組枠部1列分を0.5mm(0.2mmと0.3mmの2回に分けて)程度 切削する。
- 2) 組枠を120° 左回転し、B面も同様に1列分の組枠を切削する。
  - ※ 本作業はノックバー固定のために施されている点付けTIG溶接部の切削を目的とする。



#### 2. ノックバー押出し

- 1) M/Sマニプレータにて押出し治具を持ち、ノックバー(下段)を押出す。
  - ノックバーは上段及び下段で構成されており、テーパ加工が施されていることから一定方向にしか抜けない構造になっている。

#### 想定されるリスク及び問題点

- ①押出し治具でノックバーを押出す際、ノックバーの側面が斜め のため、治具の先端が滑り押出しが困難である。(下図参照)
- ②TIG溶接切削時に発生するバリ等の影響によりノックバーが押出せない場合もある。

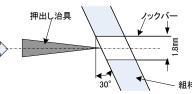


図-3 ノックバー押出し

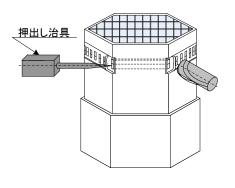


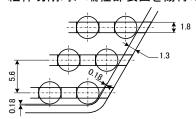
図-4 組枠部切削

#### 3. 組枠部切削

組枠部表面切削と同様の方法でF面及びB面を0.2~0.3mm程度切削後、ノックバー押出しを試みる。ノックバーが抜けない場合には、本作業を組枠が貫通するまで繰り返す。

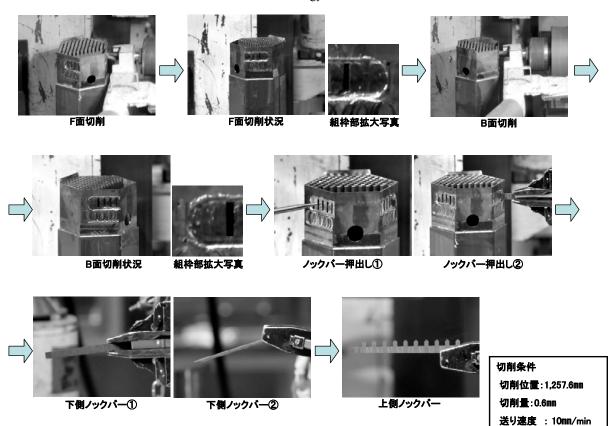
#### 想定されるリスク及び問題点

組枠内面と端栓までの距離が0.18mmと短いため、エンドミルでの 組枠切削時に端栓部表面を傷付ける恐れがある。(下図参照)

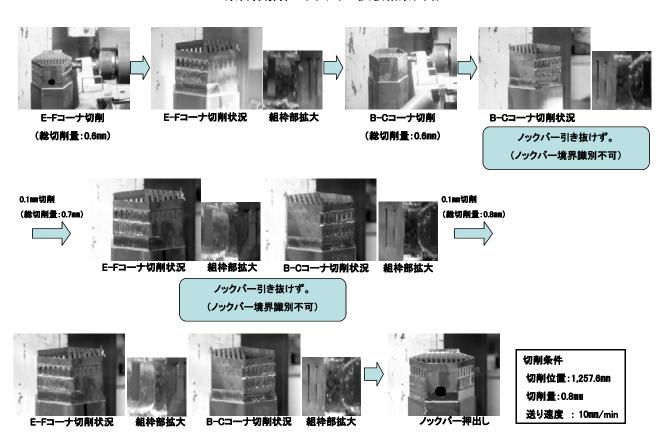


※本モックアップ手順に記載されている切削量については参考値であり、 実際には試料の状態及び作業状況等を考慮して決定する。

図8 解体済みMK-III炉心燃料集合体JS0003を用いたモックアップ試験概要



### 集合体解体モックアップ試験結果(5列)



集合体解体モックアップ試験結果(7列)

図 9 解体済み MK-III炉心燃料集合体 JS0003 を用いたモックアップ試験結果



### 1. ノックバー溶接部の除去

- ●組枠厚さ1.3mmに対して0.8mmの切削でノックバー溶接部は除去された。(切削条件の最適化 切削量:0.1~0.3mm、切削位置:集合体下端より1,257.6mm、送り速度:3mm/sec)
- ●切削後、組枠は厚さ0.5mm残った状態。

(切削量の細かい制御を行いながら組枠の完全除去も可能である)

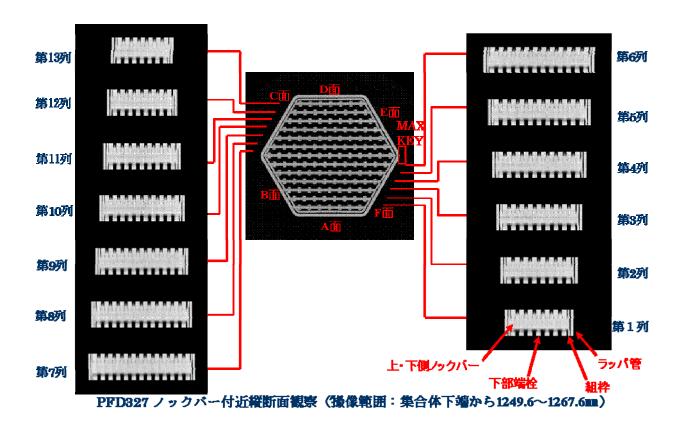




### 2. マニプレータ作業(遠隔操作性)の確認

- ●マニプレータ操作のみで、ノックバーがスムーズに取り出せた。
- ⇒ノックバーと下部端栓のノックバー挿入部の干渉はほぼ無視できる。

図 10 モックアップ試験より得られた成果



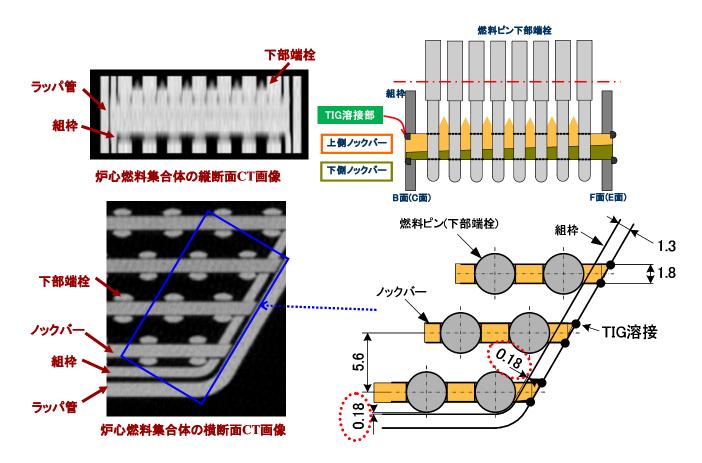
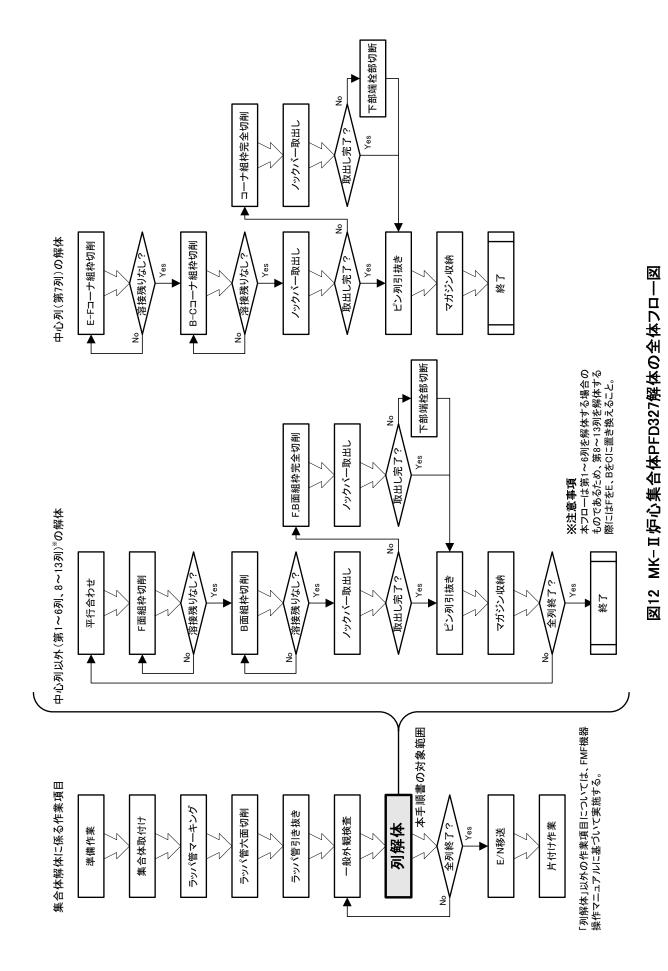
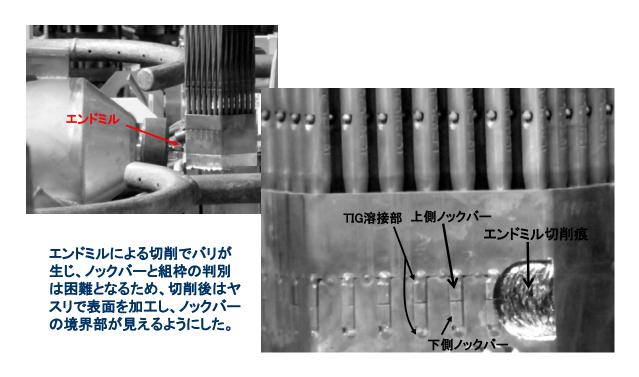


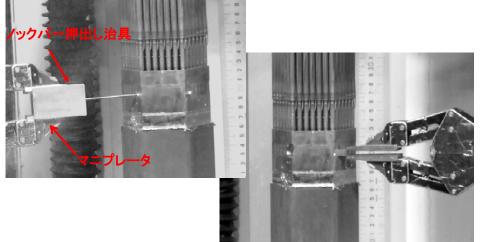
図 11 X線 CT による MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 内部観察



- 23 -



ノックバー溶接部の切削





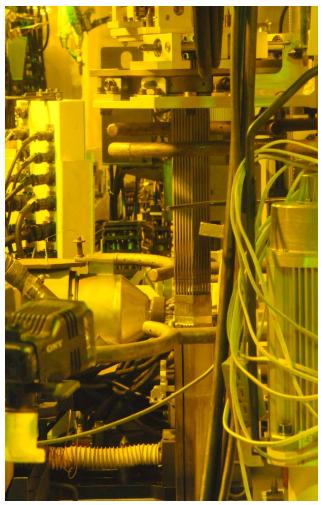


PFD327(MK-II 炉心燃料集合体)のノックバー取り出しにおいては、モックアップ試験で使用した解体済MK-III炉心燃料集合体(JS0003)と比べてノックバー寸法やノックバー溶接部の溶け込み深さの相違によりノックバーが取り出しにくいものの、下部端栓を傷付けることなく組枠の肉厚分を完全切削することによことでノックバーの取り出しを可能とした。



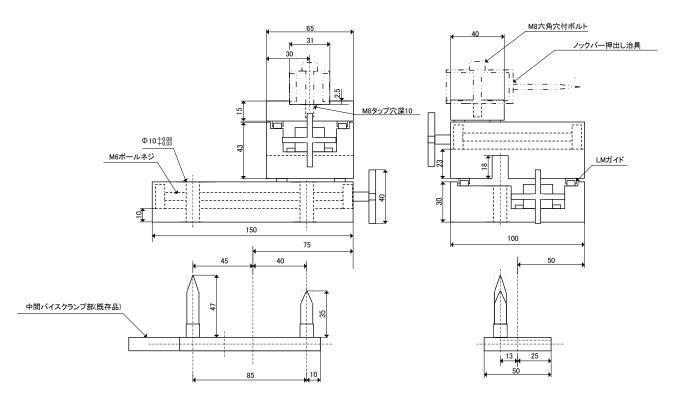
ノックバーの取り出し

図 13 MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の解体





PFD327 JS0003 残材 図 14 PFD327と JS0003 残材の試料形状比較



単位:mm

図15 ノックバー押出し用スライドテーブル

#### ■集合体外観検査

目視による外形形状変化は観測されず、特異な状況は観察されなかった。

#### ■集合体寸法検査

●全長測定、●対面間距離、●頂角間距離、●曲がり 特異な変化は観察されなかった。

#### ■X線CT検査

顕著な変形等の特異点は観察されなかった。

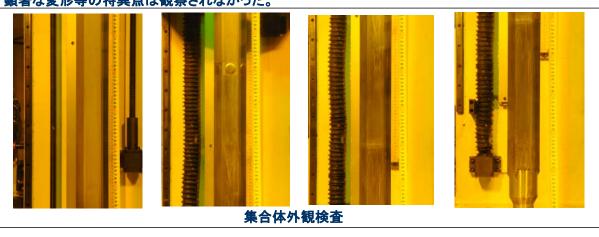


図 16 MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 の集合体試験結果

#### ■ピン列外観検査

- ●Na洗浄状況:良好、●傷、腐食:なし、●付着物:なし
- ⇒燃料ピンの健全性を損なうような特異な変化は見られなかった。

#### ■ピン詳細外観検査

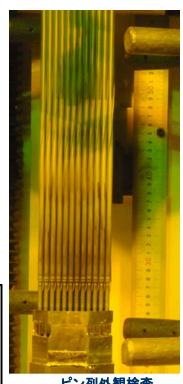
- ●被覆管接触跡観察(隣接する燃料ピンとワイヤとの接触跡)
  - :本集合体特有の接触跡は観察されなかった。
- ●被覆管表面状況観察(自己ワイヤ跡及び変色等)
  - :本集合体特有の表面状況は観察されなかった。

#### ■ピン寸法

- ●全長、●外径、●曲がり
- ⇒特異な変化は見られなかった。
- ■ピン重量測定

製造時とのPIE時の重量差において測定誤差(±0.4g)を超える重量変 化は確認されなかった。

- ■これまでの集合体試験、燃料ピン試験結果より、
  - ●他のMK-II 炉心集合体と比べ特異な変化は観察されなかった ⇒長期水中貯蔵の影響は見られていない
- ●ピン重量測定では、下部端栓の切しろ分を考慮しなくても良いため、 測定誤差が±0.7gから±0.4gと小さくなった。
- ●金相、破壊試験は今後実施予定



ピン列外観検査

#### 4. 本解体手法の応用

本解体手法により、照射済み炉心燃料集合体から B 型照射燃料集合体への燃料ピン継続照射が実現可能となり、燃料集合体再装荷の許認可対応で照射試験が必要となった場合にも対応できるようになった。

また、炉心燃料集合体だけでなく同じバンドルタイプである C 型照射燃料集合体 (UNIS-C Uninstrumented Fuel Irradiation Subassembly Type-C) のすべての燃料ピンを継続照射に供することが可能となる。図 18 に示す C 型照射燃料集合体は、試験用燃料ピンをバンドル(束)の状態で照射し、主にバンドルとしての照射挙動を調べるものであり、二重ラッパ管構造により任意の直径の試験用燃料ピンによるバンドル照射が可能なことから、「もんじゅ」や「実証炉」の燃料ピンバンドル確性試験等に用いられる。C 型燃料集合体の燃料ピン 固定方法には炉心燃料集合体と同様のノックバー方式があり、C 型照射燃料集合体等の解体に本手法を適用することで、照射済み燃料ピンの燃料溶融限界線出力(PTM)試験及び、高燃焼度燃料ピン照射試験が短期間に実現できる等、継続照射試験の多様化が図られることとなり、FaCT プロジェクトを推進していく上で重要な再装荷技術になると考えられる。

現在、C型照射燃料集合体のうち PFC060 が継続照射中であり、表 6 に PFC060 の照射条件を示す。PFC060 は、MK-II 第 35-2 サイクル終了後に一旦照射試験を終了し、FMS ホットセル内で中間検査、外側ラッパ管を交換し、再組立後に継続照射が実施中である。PFC060 の照射終了後に本解体手法を適用することで、さらに継続照射が実施可能となる。

# 表6 C型照射燃料集合体PFC060の照射条件

炉心装荷日	H 3. 3.29
炉心取出日	-
EFPD [日]	614
照射サイクル(装荷位置)	MK-Ⅱ第23サイクル~MK-Ⅱ第23‴サイクル(3E1)
	MK-Ⅱ第24サイクル~MK-Ⅱ第28サイクル(3E3)
	MK-Ⅱ第30サイクル~MK-Ⅱ第35-2サイクル(3D2)
燃焼度[MWd/t] 集合体平均	$5.43 \times 10^4$
最高	$7.94 \times 10^4$
照射量 [n/cm²] E≧0.1MeV	1.268 × 10 <sup>23</sup>

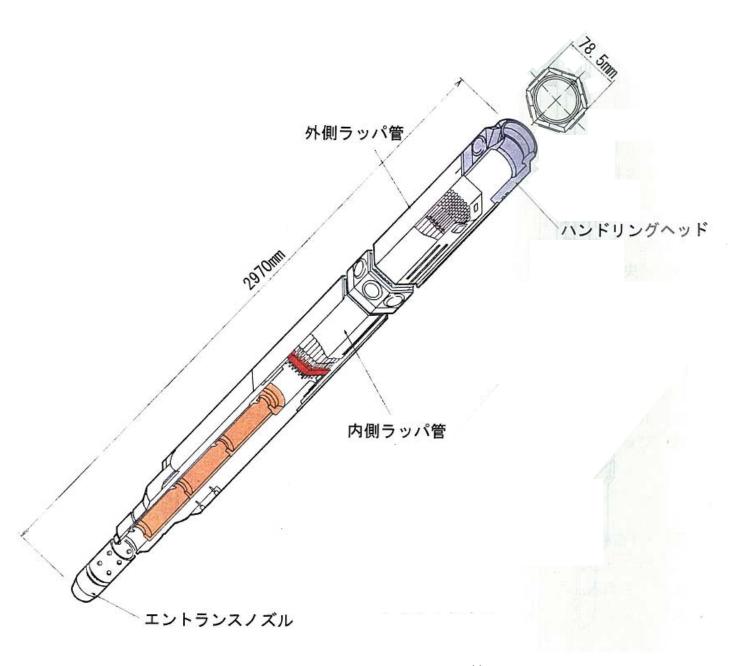


図 18 C型照射燃料集合体<sup>(1)</sup>

#### 5. まとめ

本解体手法は、継続照射試験に不可欠な再装荷技術に含まれるものであり、照射試験計画において柔軟性と多様性を持たせることが可能である。今後「常陽」で照射され保管している貴重な炉心燃料集合体やC型炉心燃料集合体(例えば現在、外側ラッパ管を交換し、継続照射中であるPFC060)の解体に適用することにより、高速増殖炉燃料の照射挙動が迅速かつ効率的に解明でき、高速増殖炉の実用化に向けた研究開発に大いに貢献することが期待される。

以下に高速実験炉「常陽」炉心燃料集合体の解体手法の高度化の成果をまとめる。

- (1) 「常陽」炉心燃料集合体の解体手法を改良して、燃料ピンの下部端栓を切断せずに、集合体を解体することが可能となった。
- (2)「常陽」MK-II 炉心燃料集合体 PFD327 へ本解体手法を適用し、燃料ピンに傷等を付けることなく TIG 溶接部を除去し、マニプレータでノックバーを取り出すことができ、下部端栓を切断することなく全ての燃料ピン (13 列、127 本)を取り出せた。
- (2) 燃料ピン取り出しに係る新たな解体手法では、1 列当たり約 2 日で、約 26 日の期間を要した。任意の燃料ピン取り出し時には、従来の解体手法(1 列当たり約 0.5 日で、計約 7 日間)と組合せることで工程の短縮を図れる。
- (5) 炉心燃料集合体で照射した燃料ピンのキャプセル型照射リグを用いた継続照射の実施に見通しが得られ、低燃焼度燃料の再装荷計画への反映も可能となった。
- (6) 燃料ピンの固定方法が同じノックバー方式の C 型照射燃料集合体などバンドル型燃料集合体の燃料ピン継続照射のオプションが広がった。
- (7) 長期水中貯蔵燃料集合体 PFD327 の PIE を実施し、長期水中貯蔵による影響がないことを確認した。 今後破壊試験について材料強度特性等を確認する予定である。
- (8) 本解体結果を踏まえ、今後は作業効率の改善を図るため冶具の改良等を実施する予定である。

### 謝辞

本手法の高度化にあたり、CT 試験装置による撮像において燃料材料試験部の石見 明洋氏、検査開発株式 会社の久保 宏明氏、三澤 進氏に多大な協力を頂き感謝申し上げます。

# 参考文献

(1) 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: 照射センター利用ガイド, 2000.6

# 国際単位系(SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位		
本半里	名称	記号	
長 さ	メートル	m	
質 量	キログラム	kg	
時 間	秒	s	
電 流	アンペア	A	
熱力学温度	ケルビン	K	
物質量	モル	mol	
光 度	カンデラ	cd	

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	SI 基本単位		
和立里	名称	記号		
面	積 平方メートル	$m^2$		
体	積 立法メートル	$m^3$		
速 さ , 速	度メートル毎秒	m/s		
加速	度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$		
波	数 毎メートル	m <sup>-1</sup>		
密度, 質量密	度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>		
面 積 密	度キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>		
比 体	積 立方メートル毎キログラム	m³/kg		
電 流 密	度アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>		
磁界の強	さアンペア毎メートル	A/m		
量濃度 <sup>(a)</sup> ,濃	度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>3</sup>		
質 量 濃	度キログラム毎立法メートル	kg/m <sup>3</sup>		
輝	度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>		
屈 折 率	(b) (数字の) 1	1		
比 透 磁 率	(b) (数字の) 1	1		

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度
- (albatine concentration) ともよばれる。 (substance concentration) ともよばれる。 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

衣 3. 固有の名称と記方で衣されるSI組立単位				
		SI 組立単位		
組立量	名称	記号	他のSI単位による	SI基本単位による
			表し方	表し方
	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 (p)	m/m
	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	$m^{2/}m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		$s^{-1}$
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
	パスカル	Pa	$N/m^2$	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電荷,電気量	クーロン	C		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静 電 容 量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁 束 密 度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
	ヘンリー	Н	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	$^{\circ}$ C		K
· ·	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 (f)	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		$s^{-1}$
吸収線量, 比エネルギー分与,	グレイ	Gy	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
カーマ	-	ау	o/Kg	III S
線量当量, 周辺線量当量, 方向	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
性線量当量,個人線量当量	シーベルト、。	NG	J/Kg	
	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol
(A)CI採頭部は田方の夕新し和具も挟へ知力単位し知り合われても 店田づき Z 1 か1 採頭部を仕1 を単位はもはの				

- 酸素活性|カタール kat | s¹mol (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
  (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
  (e) 池外学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。(d) へルソは周頻現象についてのみ、ペクレルは放射性接種の統計的過程についてのみ使用される。(d) やルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの増別な名称で、セルシウス温度開展を表す表慮に使用られる。セルシウス度とケルビンの地単位の大きなは同である。したがって、温度差や温度開展を表す表慮に使用られる。セルシウス度とケルビンの(b) 数料性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。(g) 単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表 4 単位の由に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

表 4 . 単位 0	)中に固有の名称と記号を含		立の例	
	S	SI 組立単位		
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘 度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>	
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>	
表 面 張 力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>	
熱容量,エントロピー		J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>	
比熱容量,比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^{-2}$	
熱 伝 導 率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>	
	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> sA	
	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> sA	
誘 電 率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>-3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>	
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>	
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>	
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg⁻¹sA	
吸 収 線 量 率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2 s^{-3}$	
放射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>4</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s	
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> mol	

	表 5. SI 接頭語									
ľ	乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号				
	$10^{24}$	ヨ タ	Y	10 <sup>-1</sup>	デ シ	d				
	$10^{21}$	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c				
	$10^{18}$	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	₹ <i>リ</i>	m				
	$10^{15}$	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ				
	$10^{12}$	テラ	Т	10-9	ナーノ	n				
	$10^{9}$	ギガ	G	10-12	ピコ	р				
	$10^{6}$	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f				
	$10^{3}$	丰 口	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a				
	$10^{2}$	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z				
	$10^1$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	у				

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
目	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>			
リットル	L, l	1L=11=1dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>			
トン	t	1t=10 <sup>3</sup> kg			

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

名称				記号	SI 単位で表される数値		
電	子力	ベル	ト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J		
ダ	ル	卜	ン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg		
統一原子質量単位				u	1u=1 Da		
天	文	単	位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m		

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位 記号 SI 単位で表される数値 名称 1 bar=0.1MPa=100kPa=10<sup>5</sup>Pa bar 水銀柱ミリメートル nmHg 1mmHg=133.322Pa オングストローム  $1 \text{ Å=0.1nm=100pm=10}^{-10} \text{m}$ Å 海 里 1 M=1852m Μ  $1 b=100 \text{fm}^2=(10^{-12} \text{cm})2=10^{-28} \text{m}^2$ バ b kn 1 kn=(1852/3600)m/s ネ Np SI単位との数値的な関係は、 対数量の定義に依存。 11 В ル dB -

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J
ダ イ ン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> cd m <sup>-2</sup>
フ ォ ト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガ ウ ス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10³/4π)A m <sup>-1</sup>

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≦ 」は対応関係を示すものである。

表10 SIに届さないその他の単位の例

名称 記号					記号	SI 単位で表される数値
牛	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\nu$	ン	卜	ゲ	ン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\nu$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		ン		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	x		ル	3		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	ートル	系	カラ:	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
卜				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力	口		IJ	ı	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー),4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク		U	ン		1 u =1um=10 <sup>-6</sup> m