JAERI-Tech
2004-023

JP0450288

ハルデン炉を利用した日本の燃料照射研究

ー ハルデン共同研究（2000-02年）の成果 ー

（共同研究）

2004年3月

ハルデン共同研究合同運営委員会

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは，日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは，日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村）あて，お申し越しください。なお，このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195　茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.
Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 2004

編集兼発行　　日本原子力研究所

ハルデン炉を利用した日本の燃料照射研究
-ハルデン共同研究(2000-02年)の成果-
(共同研究)

日本原子力研究所東海研究所
ハルデン共同研究合同運営委員会※

(2004年1月27日受理)

日本原子力研究所は国内の諸機関との間でノルウェー・ハルデン市にあるハルデン沸騰型重水原子炉（HBWR）を利用した複数の共同研究を行っている。これらの共同研究は、OECD/NEA ハルデン原子炉計画（ハルデン計画）への原研の加盟期間の更新に合わせて、3 年毎に更新する共同研究契約に基づいて実施している。本報告書は、各共同研究について、その目的、内容及び2000年1月から2002年12月に亘る3年間の研究で得られた成果の概要をとりまとめたものである。今期3年間には、7件の共同研究を行った。このうち2件は契約期間内に研究を終了し、残り5件は次期期間（2003.1-2005.12）でも継続して研究を実施することとなった。研究の多くは軽水炉燃料の高燃焼度化に対応した改良燃料や被覆管の照射挙動研究及びプルサーマルの本格導入に備えた MOX 燃料の照射挙動研究である。　燃料照射研究は、試験準備や照射などに長期間を要することが多い。5件を次期期間でも継続して研究することにしたのは、この3年間では照射試験が完結せず引き続き、照射試験の継続が必要であるためである。したがって、本報告書にまとめた成果のうち、これら5件の共同研究の成果は中間報告の段階にとどまっている。

東海研究所：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4
※ハルデン共同研究合同運営委員会（2003年3月現在、順不同）

上塚　寛	（委員長：原研）	中村　仁一	（委員会幹事：原研）
木下　幹康	（電力中央研究所）	安部　智之	（核燃料サイクル開発機構）
林　　洋	（原子力発電技術機構）	久保田　修	（東京電力㈱）
緒方　恵造	（日本核燃料開発㈱）	和田　諭	（ﾆｭｰｸﾘｱ･ﾃﾞﾍﾞﾛｯﾌﾟﾒﾝﾄ㈱）
伊東　賢一	（ｸﾞﾛｰﾊﾞﾙ･ﾆｭｸﾘｱ･ﾌｭｴﾙ㈱）	川島　範夫	（㈱日立製作所）
安部田貞昭	（三菱重工業㈱）	小林　慎一	（原子燃料工業㈱）
井勝　伸彦	（原子燃料工業㈱）		
河野　清	（事務局：日本原子力産業会議）	高岡　和夫	（事務局：原研）

Fuel Irradiation Research of Japan at Halden Reactor
−Achievement of Cooperative Researches between JAERI and Several Organizations in the Period from 2000 to 2002−
(Joint Research)

The Committee of the Halden Joint Research Programme※

Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 27, 2004)

JAERI has performed cooperative researches with several Japanese organizations utilizing the Halden Boiling Heavy Water Reactor(HBWR) which is located at Halden in Norway. These researches are carried out based on the contracts of the cooperative researches, which are revised every three years, in accordance with the renewal of the participation of JAERI to the OECD Halden Reactor Project. This report summarizes the objectives, contents and outlines of the achievements of the cooperative researches during the three years from 2000 January to 2002 December. During the period, seven cooperative researches had been carried out. Two of them had been completed and other five researches have been continued to the next three-year period. Most of them are irradiation test researches of advanced fuel and cladding in order to prepare the higher burnup utilization and introduction of LWR fuel and MOX fuel in LWRs of Japan.

As the researches of fuel irradiation usually take long time for preparing test and irradiation, three years are usually not enough to obtain some achievements from the irradiation tests. Therefore, five cooperative researches have been continued to the next three-year period. In this report, the achievements of the researches continued to the next period are not final one but a kind of progress report.

Keywords:Halden,Cooperative Research,Fuel Irradiation,HBWR,Progress Report

※The members of Committee of the Halden Joint Research Programme (as of March 2002, Names not in order)

Hiroshi Uetsuka(Chairman, JAERI)
Motoyasu Kinosita(CRIEPI)
Hiroshi Hayashi(NUPEC)
Keizo Ogata(NFD)
Kenichi Ito(GNF)
Sadaaki Abeta(MHI)
Nobuhiko Ikatsu(NFI)
Kiyoshi Kohno(JAIF)
Jinichi Nakamura(Secretary,JAERI)
Tomoyuki Abe(JNC)
Osamu Kubota(TEPCO)
Satoshi Wada(NDC)
Norio Kawashima(Hitachi)
Shinichi Kobayashi(NFI)
Kazuo Takaoka(JAERI)

目　次

1. まえがき…… 1

2. 混合酸化物燃料(MOX)の照射特性に関するハルデン炉での照射試験…… 6
（三菱重工／日本原子力研究所）

3. HBWR における BWR 用混合酸化物燃料(MOX)の照射挙動に関する研究……14
（日本核燃料開発／日本原子力研究所）

4. HBWR における BWR 用改良燃料の照射挙動に関する研究……17
（原子燃料工業／日本原子力研究所）

5. 高燃焼度 PWR 改良被覆管燃料棒の HBWR における照射試験…… 20
（原子力発電技術機構／日本原子力研究所）

6. HBWR における過渡沸騰遷移挙動の照射研究……27
（東京電力／日本原子力研究所）

7. HBWR による高燃焼時の軽水炉燃料挙動に関する研究……30
（電力中央研究所／日本原子力研究所）

8. HBWR における高価値制御棒供試体の照射試験……32
(日立製作所／日本原子力研究所）

9. 総括…… 37

謝辞……38

Contents

1. Introduction 1

2. MOX Fuel Irradiation Test in HBWR 6
(MHI/JAERI)

3. Irradiation Test of BWR-MOX Pellets in HBWR 14
(NFD/JAERI)

4. Irradiation Study of Advanced BWR Fuel in HBWR 17
(NFI/JAERI)

5. High Burn-up PWR Irradiation Test of Improved Clad in HBWR 20
(NUPEC/JAERI)

6. Irradiation Test of Fuel Behavior under Transient Boiling Condition in HBWR 27
(TEPCO/JAERI)

7. Study of High Burnup LWR Fuel Behavior based on HBWR Data 30
(CRIEPI/JAERI)

8. Irradiation Test of High-worth Control Rod Material in HBWR 32
(Hitachi/JAERI)

9. Summary 37

Acknowledgement 38

1. まえがき

OECD/NEA のハルデン原子炉計画（以下、ハルデン計画と記す。）は、ノルウェー・ハルデンにあるエネルギー技術研究所（IFE）のハルデン沸騰型重水原子炉(Halden Boiling Heavy Water Reactor,HBWR)を利用する国際協力研究で、1958 年に開始された。本計画は当初の数年間を例外として、その後は３年毎に協定を更新し現在に至っている。日本は、1967 年に日本原子力研究所（原研）を代表機関として本計画に加盟し、現在に至るまで 12 回の契約更新を重ね、燃料照射研究とコンピュータ応用研究から発展したマンマシン研究等を行ってきた。本計画には、加盟機関の合意・監督の下にハルデンプロジェクトが実施する合同試験（Joint Program）と加盟機関が IFE との双務契約の下で行う加盟者試験（Bilateral Program）とがある。日本の加盟者試験としては、原研独自の燃料照射試験とともに原研と諸機関、すなわち動力炉・核燃料開発事業団（現核燃料サイクル開発機構）、原子力発電技術機構（原技機構）等や民間会社との間の共同研究としての照射試験を実施してきた。これらの総数は、第 12 次協定期間の終了時点である 2002 年 12 月までの合計で 61 件を数える（Table 1.1 参照）。

ところで、燃料照射研究は一般に多額の予算と時間を要する。原研が、諸機関との共同研究を積極的に実施しているのは、研究を効率的に進めるためであり、このような認識は共同研究の相手である諸機関にも共通のものである。また、一つの共同研究で得られる知見は他の共同研究にとって極めて有用である場合が多い。このような事情から、原研を中心として、ハルデン炉を利用した共同研究を実施しているすべての機関及びその関係機関が参加して「ハルデン共同研究合同運営委員会」を設立した。この中では、各共同研究の進捗状況を紹介し、技術的な情報交換を行っている。

共同研究によって得られた成果は、個別の照射試験結果がまとまった時点や研究終了後に研究報告書や国際会議発表論文などの形で適宜報告されている。また、我が国がハルデン炉で実施している燃料照射研究を概観するための報告書として、下記の原研の公開報告書が随時公刊されてきた。

- ハルデン HBWR における燃料照射共同研究　JAERI-M 84-031
- ハルデン原子炉計画における日本の燃料照射研究
  －ハルデン共同研究（1988-90 年）の成果－　JAERI-M 92-155
- ハルデン原子炉計画における日本の燃料照射研究
  －ハルデン共同研究（1991-93 年）の成果－　JAERI-Tech 94-021
- ハルデン原子炉計画における日本の燃料照射研究
  －ハルデン共同研究（1994-96 年）の成果－　JAERI-Tech 97-066
- ハルデン炉を利用した日本の燃料照射研究
  －ハルデン共同研究（1997-99 年）の成果－　JAERI-Tech 2000-066

本報告書は、上記報告書と同じく、第 12 次協定期間内に実施された研究をすべて網羅し、関係者等の利用に供することを目的にまとめたものである。第 12 次協定期間である 2000 年 1 月から 2002 年 12 月の３年間に実施した研究は、Table 1.2 に示すように 7 件である。これらの 7 件は燃焼度の伸長を主な理由に前期協定から継続されたものである。このうちの 2 件「高燃焼度 PWR 改良被覆管燃料棒の HBWR における照射試験」と「HBWR における過渡沸騰遷移挙動の照射研究」は研究を終了したが、他の 5 件については、現在も照射試験を継続中であり、現時点では必ずしも最終的な成果は得られていない。また、別途詳細な報告書が作成されている研究については、参考のために、各章末に文献を添付した。

Table 1.1 ハルデン炉による日本燃料の照射試験
（Ⅰ.１９７５年以前照射開始のもの）

No	燃料番号	所属	研究目的	照射期間	燃焼度 (GWd/t)
1	IFA 106	原研	JPDR-Ⅱ燃料の確性試験（短尺）	11/67~10/69	11.3
2	107	原研		11/67~ 8/68	4.2
3	149	原研	JPDR-Ⅱ燃料の確性試験（長尺）	5/68~ 5/69	7.2
4	150	原研		5/68~ 4/70	11.5
5	159	動燃	UO_2-PuO_2 水炉燃料の確性	6/68~ 5/70	9.4
6	160	動燃		3/69~ 5/70	5.3
7	206	動燃	ATR燃料の確性試験	1/71~ 9/72	5.0
8	207	動燃		5/71~ 1/73	7.2
9	208	原研	高出力下のペレット・クラッド相互作用	1/71~ 9/71	6.3
10	209	原研	水素富化被覆管燃料の挙動	5/71~ 5/73	10.1
11	210	原燃工	高出力下の燃料挙動	1/71~ 5/74	26.7
12 13	211	日立	バーナブルポイゾン効果，ペレット・クラッド相互作用	1/71~ 5/74	18.0
	212	三菱	PWR型被覆管の照射効果	1/71~ 9/73	28.6
14	223	東芝	バーナブルポイゾン効果，ペレット・クラッド相互作用	5/71~10/74	22.5
15	224	原研	低密度燃料のペレット・クラッド相互作用	2/72~11/73	11.8
16	225	原研	燃料内水分の効果	2/72~ 6/72	3.5
17	230	原燃工	ペレット・クラッド相互作用	1/71~ 3/74	22.0
18	410	日立／東芝	燃料中心温度ペレット・クラッド相互作用　短尺	1/73~ 2/77	11.3
19	411	日立／東芝	燃料中心温度ペレット・クラッド相互作用　長尺	11/73~10/78	25.6
20	412	東芝	長期間照射(ハルデン乗合リグ)-出力急昇	5/74~ 8/78	9.3
21	421	三菱	ペレットの焼きしまり特性	10/74~11/76	5.4
22	423	動燃	ATR用UO_2 -PuO_2燃料の確性	6/75~11/76	4.4
23	424	原燃工	ペレットの焼きしまり特性	10/74~ 5/77	9.3

Table 1.1 ハルデン炉による日本燃料の照射試験
(Ⅱ.１９７６年以後照射開始のもの)

No	燃料番号	所属	研究目的	照射期間	燃焼度 (GWd/t)
24	501	日立／東芝	IFA-519用燃焼度蓄積	12/79~10/84	25.0
25	502	日立／東芝	出力変動と炉内直径測定	9/77~ 9/79	8.5
26	508	原研	炉内直径測定によるペレット・クラッド相互作用	6/77~ 2/80	23.0
27	510	三菱	燃料棒接触の効果	3/78~ 3/79	5.0
28	514	動燃	軽水炉用UO_2-PuO_2ペレットの焼きしまり，他	7/79~11/88	40.5
29	515	原研	IFA-508用燃焼度蓄積	9/77~ 3/81	17.0
30	519	日立／東芝	直径測定（BWR改良燃料）	9/79~10/84	14.0
31	520	原研	BWR型出力急昇試験	6/82~ 1/85	23.0
32	523	原研	BWRベース照射	2/80~ 1/85	23.0
33	524	原研	PWRベース照射	2/80~ 1/85	20.0
34	525	原研	PWR型出力急昇試験	6/82~ 1/85	20.0
35	529	動燃	軽水炉用PuO_2 -UO_2照射燃料	6/80~10/86	25.4
36	530	東芝	ガドリニア入り燃料の照射	11/81~ 3/84	8.0
37	539	三菱	ガドリニア入り燃料棒の照射	2/84~ 9/85	10.0
38	551	日本核燃料開発	高燃焼度燃料の特性	12/86~10/95	45.0
39	554	動燃	IFA-555用ベース照射	11/85~ 6/93	31.0
40	555	動燃	ATR実証炉燃料の負荷追従試験	11/85~ 6/93	32.7
41	559	三菱	ＰＷＲ用UO_2-PuO_2燃料の特性	12/87~ 2/93	33.9
42	561	三菱	高濃度ガドリニア入り及び改良燃料の照射	6/90~11/92	17.8
43	565	動燃	軽水炉用UO_2-PuO_2燃料照射（IFA-514 延長）	10/90~11/93	49.9
44	566	日本核燃料開発	高燃焼度加速照射	4/90~ 3/95	75.0
45	592	三菱原子力	ガンマサーモメーターの照射	8/92~12/93	12.3

Table 1.1 ハルデン炉による日本燃料の照射
（Ⅲ．１９９３年以後照射開始のもの）

２００３年１月現在

No	燃料番号	所属	研究目的	照射期間	燃焼度（GWd/t）
46	594	日本核燃料開発	MOX燃料挙動	7/95~11/98 (IFA-625へ)	27.0
47	595	日本核燃料開発	MOX燃料挙動	7/95~	照射中
48	596	三菱	MOX燃料のふるまい	6/93~6/00	88.
49	601	電中研	高燃焼度リム効果	1/94~ 5/96	102.0
50	602	原燃工	大粒径ペレットの照射	1/95~10/02	67.
51	603	原燃工	改良被覆管の耐食性	1/95~3/02	59.
52	604	原燃工	改良被覆管の耐食性	1/95~3/02	59.
53	607	原技機構	BWR用被覆管の水側腐食	1/95~10/97	504EFPD*
54	608	原技機構	BWR用被覆管の水側腐食	1/95~10/97	504EFPD*
55	609	三菱	MOX燃料のふるまい	7/95~6/97 (IFA-626へ)	15.
56	613	東京電力/東芝	過渡沸騰遷移挙動	6/96~1/98	Max40**
57	616	原技機構	PWR改良被覆管燃料棒の照射	6/95~7/01	55.
58	625	日本核燃料開発	MOX燃料挙動	2/99~	照射中
59	626	三菱	MOX燃料のふるまい	12/97~	照射中
60	557	日立	高価値制御棒材の照射	6/98~	照射中
61	548	日立	高価値制御棒材の照射	7/99~	照射中

* EFPD:Effective Full Power Dayes（実行運転日数）
** 商用炉照射済燃料を過渡沸騰遷移試験に使用

Table 1.2 ハルデン共同研究一覧

題　　目	実　施　機　関	契　約　期　間
混合酸化物燃料(MOX)の照射特性に関するHBWRでの 照射試験(その4)	三 菱 重 工 業 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年 12月
HBWRにおけるBWR用混合酸化物燃料(MOX)の照射挙動に関する研究	日本核燃料開発 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年 12月
HBWRにおけるBWR用改良燃料の照射挙動に関する研究	原子燃料工業 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年 12月
高燃焼度PWR改良被覆燃料棒のHBWRにおける照射試験	原子力発電技術機構 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年　3月
HBWRにおける過渡沸騰遷移挙動の照射研究	東　京　電　力 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成13年　3月
HBWRによる高燃焼時の軽水炉燃料挙動に関する研究	電力中央研究所 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年 12月
HBWRにおける高価値制御棒供試体の照射試験	日 立 製 作 所 日本原子力研究所	平成12年　1月 ～ 平成14年　12月

2. 混合酸化物燃料（MOX）の照射特性に関するハルデン炉での照射試験

MOX Fuel Irradiation Test in HBWR

（三菱重工業（株））

2.1 研究目的

PWR における MOX 燃料の高燃焼度利用を目指し、HBWR において海外加工メーカーで製造した MOX 燃料を照射し、MOX 燃料棒の照射挙動について評価することを目的とする。

2.2 研究内容

IFA-609 / 626

PWR 用 17×17 型燃料と同様の仕様で製造された MOX 燃料棒 8 本、およびリファレンス用の UO_2 燃料棒 4 本を、平成 7 年 7 月より照射開始した。燃焼度約 70GWd/tMtl を目標に平成 16 年度まで照射する。達成燃焼度は平成 13 年 12 月時点で最大約 53GWd/tMtl（MOX 燃料棒ピーク）である。

供試 MOX 燃料は BNFL 製および COMMOX 製であり、Pu 富化度は 6.1%Puf である。中心温度（ET）、燃料棒内圧（PF）および燃料スタック長（EF）のセンサーを燃料に取り付け、照射中の燃焼挙動データを採取した。

照射リグの構造を Fig.2-1 に、試験燃料棒マトリックスを Fig.2-2 に示す。

本試験は PWR 5 電力/原子燃料工業との共同研究として実施しているものである。

2.3 成果

IFA-609 / 626

平成 13 年 12 月までの照射により、MOX 燃料ピーク燃焼度約 53GWd/tMtl を達成した。燃料中心温度の履歴および燃料棒平均線出力の履歴を Fig.2-3 に示す。IFA-609 時に計装の一部（リグおよびケーブル）に不調があり、平成 9 年 1 月に新しい照射リグ（IFA-626）に全燃料棒を移し替え、照射を継続しており、これ以降順調にデータを取得していたが、上部クラスタに設置された内圧計の一つ（MIMAS 法 MOX 燃料に設置）が平成 13 年 11 月に不調になった。

各計装についての主な結果として以下が確認された。

・燃料中心温度

Fig.2-3 において各燃料棒の中心温度に差異が見られるが、これは、各燃料棒の線出力の差異によるものであり、同一線出力においては MOX 燃料と UO_2 燃料とで燃料中心温度に明確な差異は見られない。

また、三菱燃料棒設計コード（FINE）による解析評価を行っており、MOX 燃料の出力に加え径方向出力分布及び Pu 添加による熱伝導率の低下を考慮し中心温度を評価した結果、

Fig.2-4 に示す通り MOX 燃料の中心温度は妥当に評価される。以上より、MOX 燃料の中心温度は MOX 燃料の特徴を考慮することにより UO_2 燃料と同様に評価できることを確認した。

・燃料スタック長

照射初期におけるスタック長の減少から MOX 燃料の焼きしまり量を評価した。一般的に UO_2 燃料ペレットの炉内焼きしまり量に対して確認されている炉外再焼結試験結果との相関について、MOX 燃料ペレットの焼きしまり量に対しても同様な相関を確認した。

燃料スタック長データから評価されるペレットスエリング率は MOX 燃料と UO_2 燃料とでほぼ同等であり、これは MATPRO の固体スエリング率 $\Delta V/V_0$=約 0.6%/(10GWd/t)と同等であることを確認した。

・燃料棒内圧

Fig.2-5 に MOX 燃料棒の内圧履歴を示す。同図の通り燃料棒燃焼度約 25 および 40GWd/t 前後において高出力（局所最大線出力約 30kW/m　40GWd/t）で照射されており、内圧上昇が見られる。これは燃料温度が高いため、FP ガス放出によると考えられる。尚、同様な傾向は UO_2 燃料でも見られている。

UO_2 燃料の FP 放出モデルを仮定し MOX 燃料の内圧を FINE コードにより評価した結果を Fig.2-5 に示す。同図から、内圧は保守的に評価されると共に内圧増加時期は適切に評価され、MOX 燃料の FP ガス放出についても UO_2 燃料と同様に評価できることが示唆された。

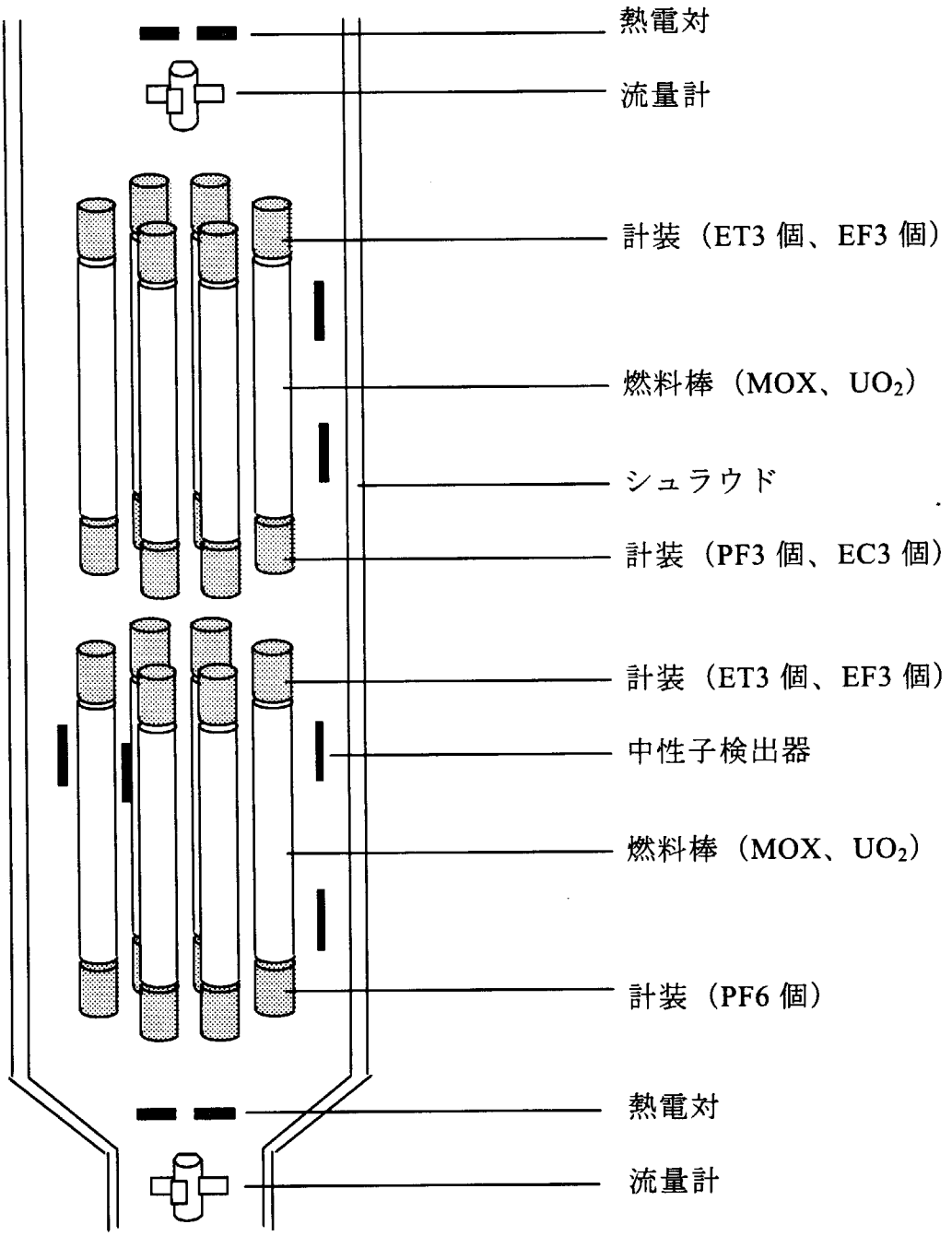


Fig.2-1　IFA-609/626 照射ﾘｸﾞ概略構造

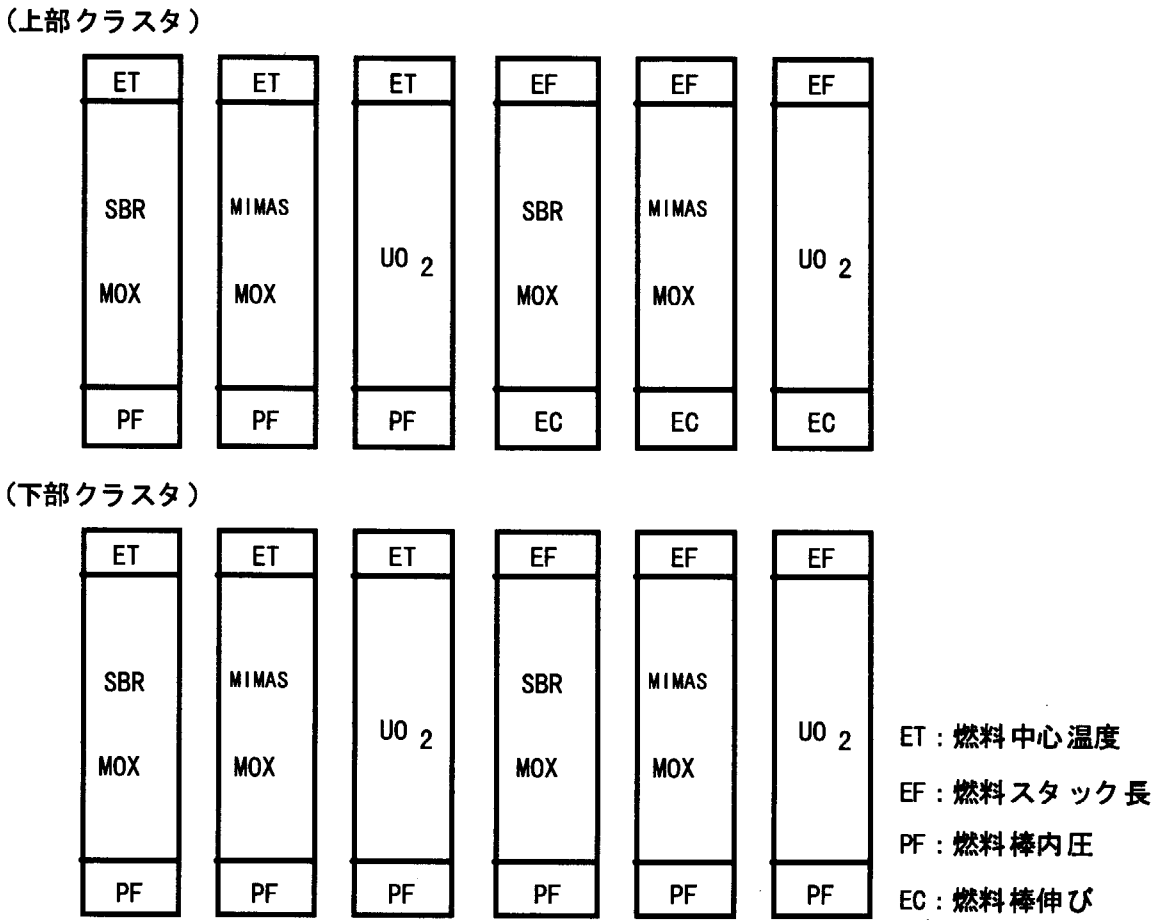


Fig.2-2　IFA-609/626 試験燃料棒ﾏﾄﾘｯｸｽ及び配列

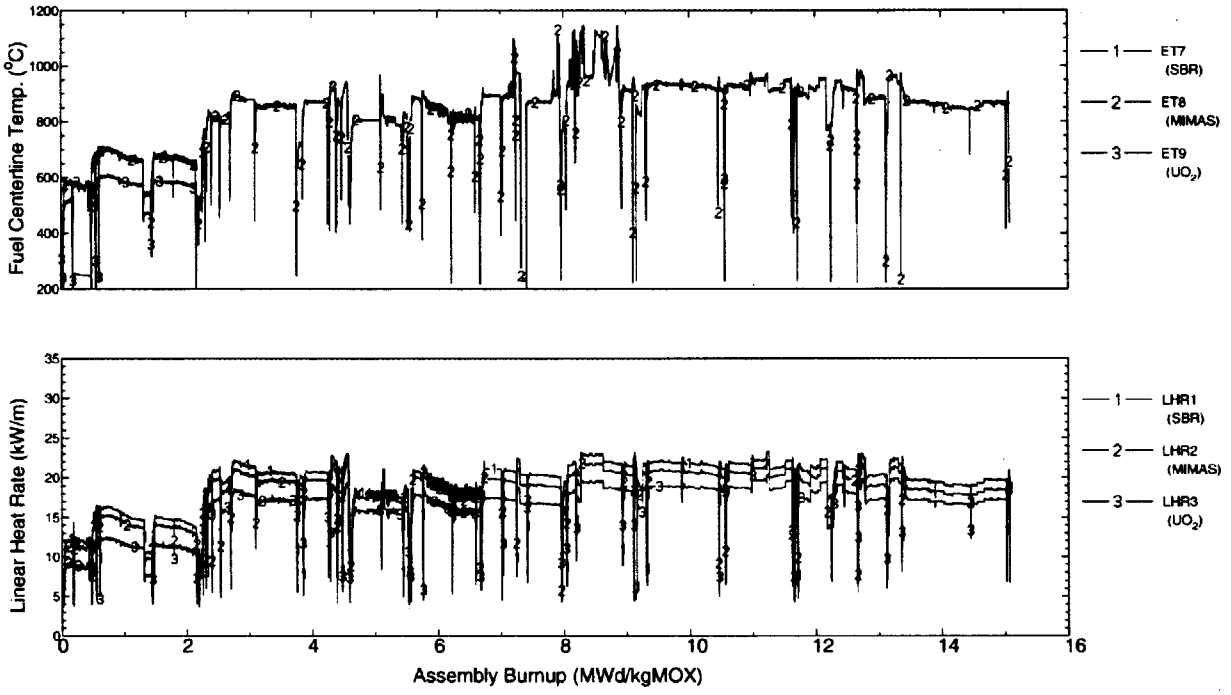


Fig.2-3(1)　下部クラスター　燃料中心温度および線出力の履歴(IFA-609)

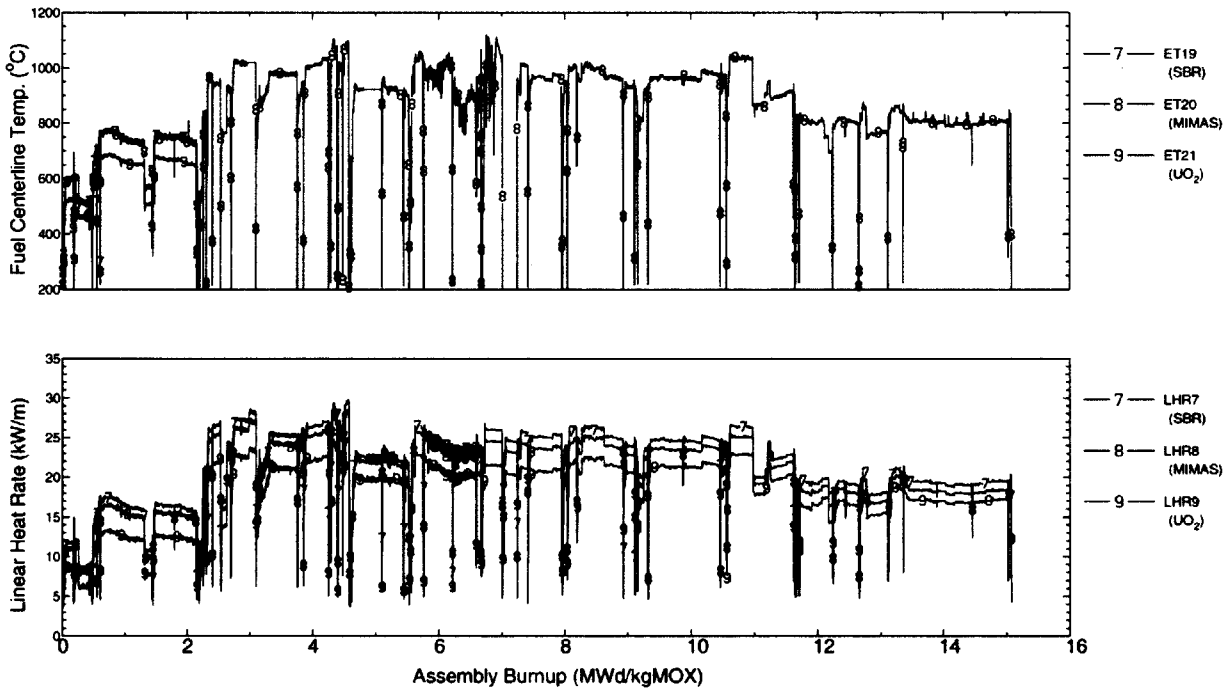


Fig.2-3(2)　上部クラスター　燃料中心温度および線出力の履歴(IFA-609)

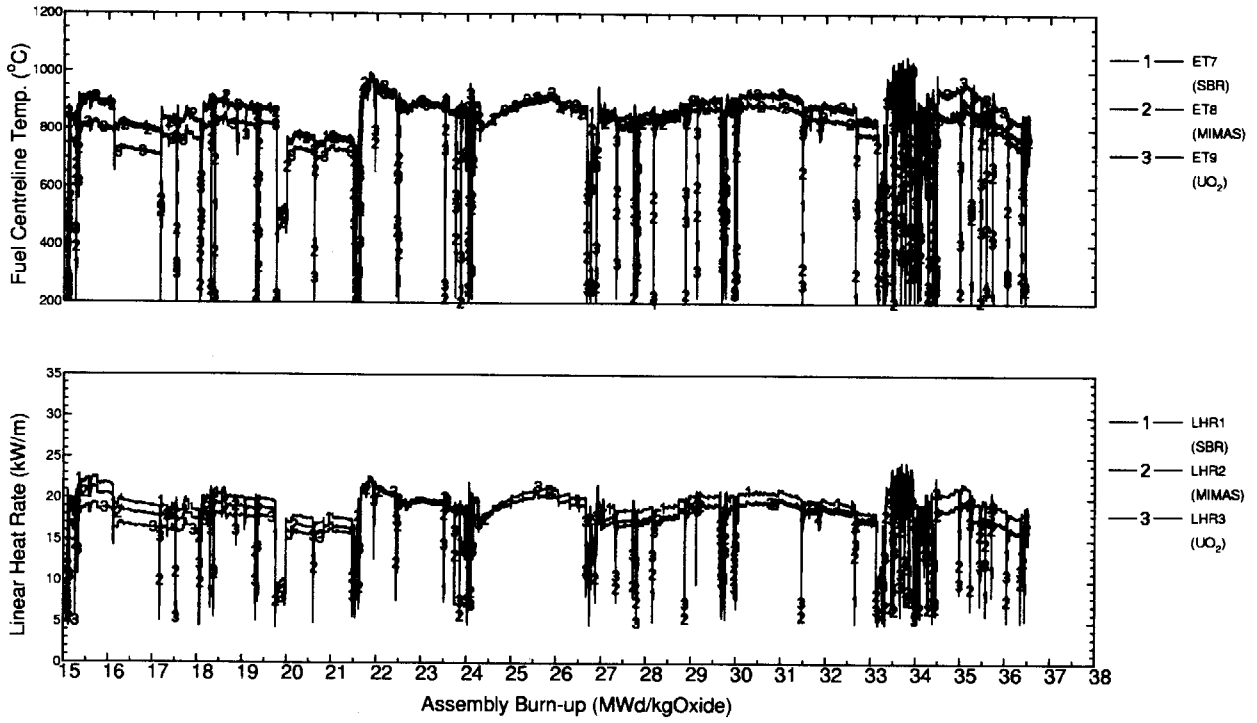


Fig.2-3(3)　下部クラスター　燃料中心温度および線出力の履歴(IFA－626)

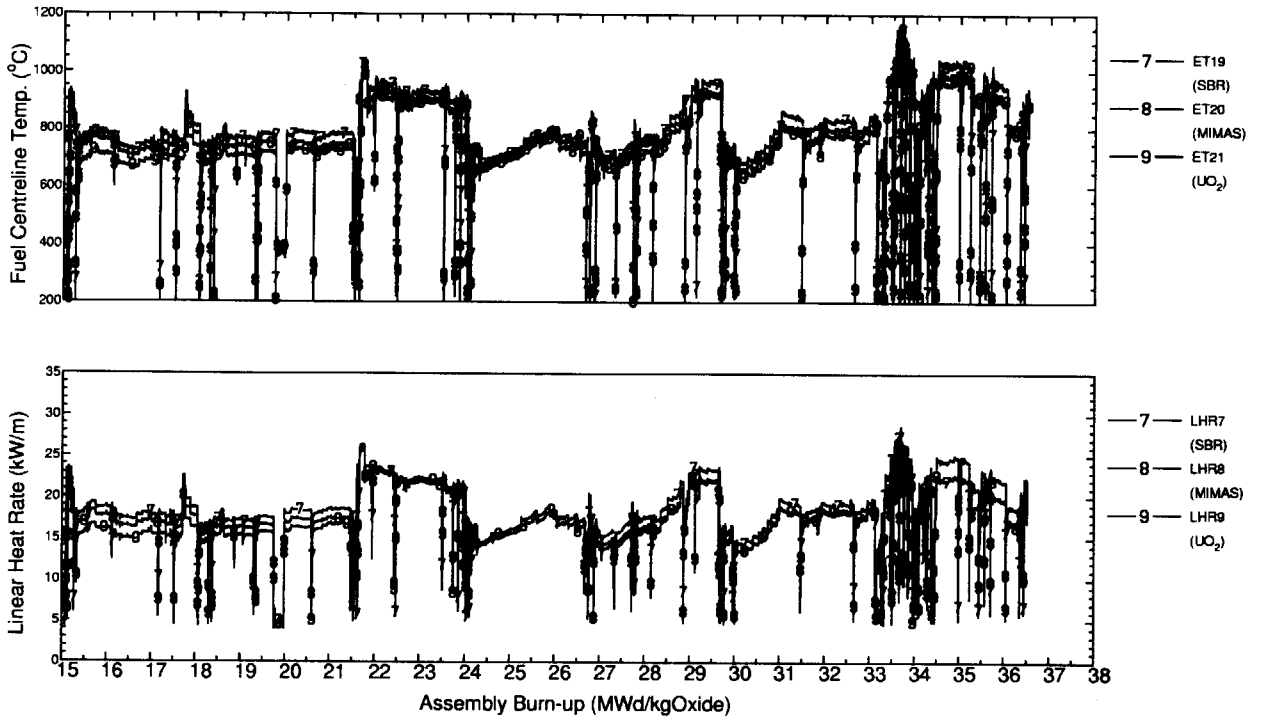


Fig.2-3(4)　上部クラスター　燃料中心温度および線出力の履歴(IFA－626)

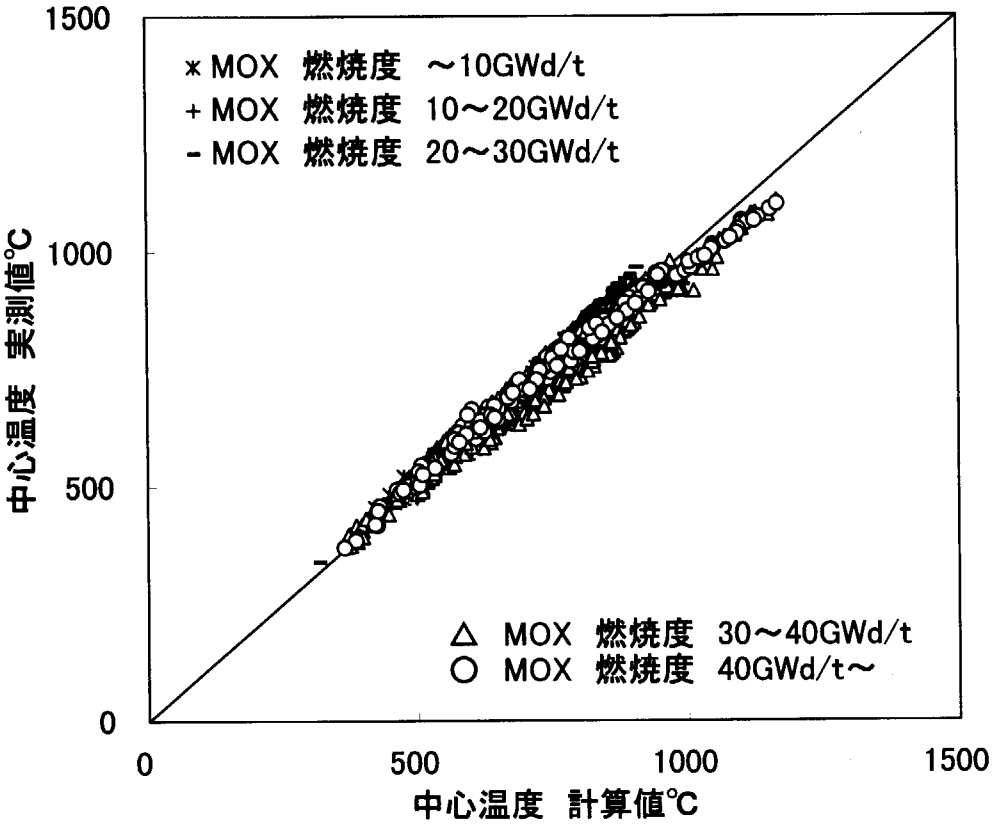


Fig.2-4 MOX 燃料の中心温度実測値と計算値との比較

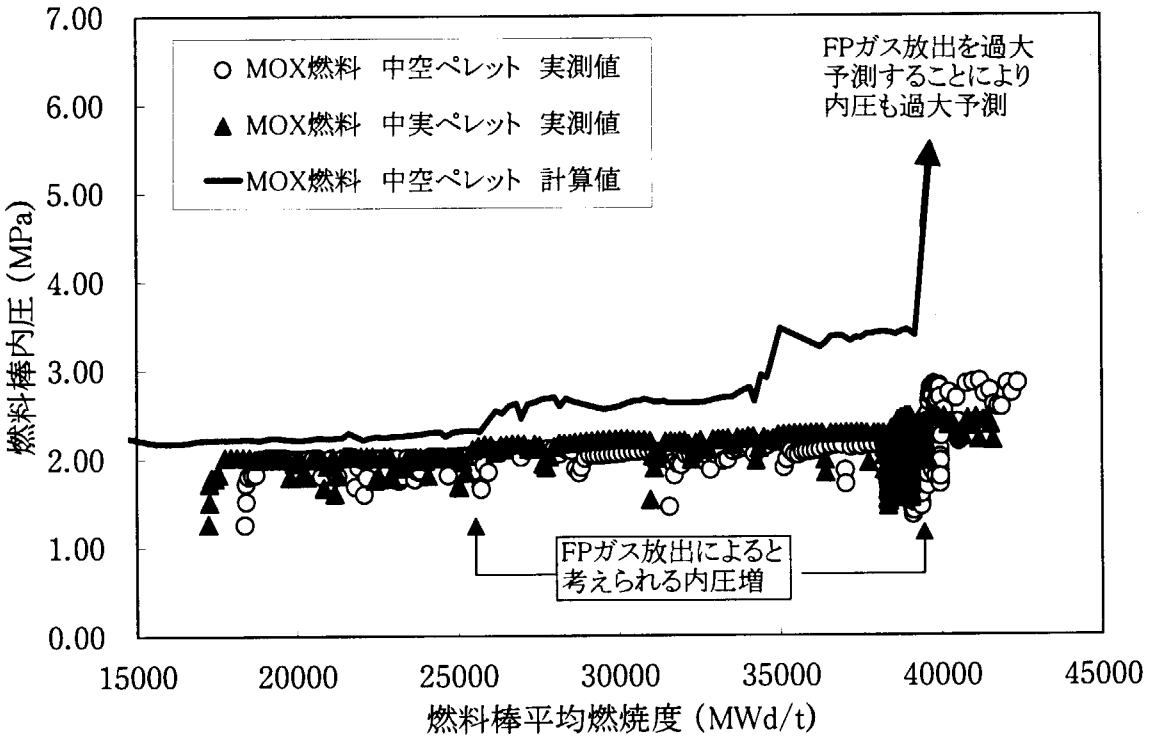


Fig.2-5 燃料棒内圧実測値と計算値の例

(社)日本原子力学会「2002年秋の大会」(2002年9月14～16日，いわき明星大学)

参考 1

E14 ハルデン炉における MOX 燃料の照射挙動評価(2)

Evaluation of MOX Fuel Irradiation Behavior at the Halden Boiling Water Reactor (2)

三菱重工業(株) ○手島 英行 TESHIMA HIDEYUKI　谷本 政隆 TANIMOTO MASATAKA　金杉 克正 KANASUGI KATSUMASA
ニュークリア・デベロップメント(株) 藤井 創 FUJII HAJIME　高阪 裕二 KOSAKA YUJI
関西電力(株) 仙藤 敏和 SENDO TOSHIKAZU

実機 PWR 仕様の MOX 燃料をノルウェー国ハルデン炉で照射し、MOX 燃料棒平均燃焼度約 43GWd/t、MOX ペレット最大約 53GWd/t までの照射データから MOX 燃料の照射挙動を確認し、健全に照射されていることを確認した。今後も照射を継続し高燃焼度域における MOX 燃料の挙動を確認していく。

キーワード:PWR、MOX 燃料、SBR 法、MIMAS 法、FP ガス放出

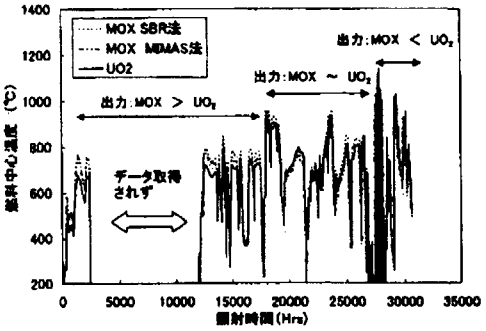


図1 MOX 燃料の中心温度履歴

1. 緒言　前回までの報告[1),2),3)]に引き続き、継続して海外照射されている 17x17 型実機仕様 MOX 燃料の照射挙動を確認した。

2. 研究結果　MOX ペレット最大燃焼度 70GWd/t を目標とし、17x17 型実機仕様の SBR 法および MIMAS 法 MOX 燃料(約 8.4wt% PuO_2-total, 約 6.1wt% PuO_2-fissile)及びリファレンス UO_2 燃料を各々4 本、計 12 本ハルデン炉で照射し、出力運転中の中心温度、内圧、スタック長伸び等を測定している。

・中心温度:　図 1 に燃料中心温度の履歴を示す。燃焼初期において MOX 燃料の中心温度は UO_2 燃料よりも高いが、これは MOX 燃料の出力が UO_2 燃料よりも高いことによる。照射中期では両燃料の温度は同程度となり、照射後期では MOX 燃料よりも UO_2 燃料の中心温度が高いが、この傾向は出力の大小の傾向と一致している。

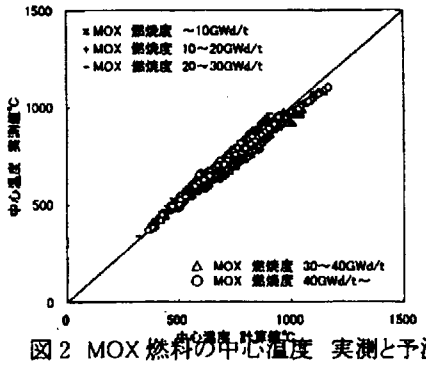


図 2 MOX 燃料の中心温度　実測と予測

MOX 燃料の出力に加え径方向出力分布及び Pu 添加による熱伝導率の低下を考慮し、三菱燃料棒設計コード(FINE コード)[3),4)]により中心温度を評価した結果、図2に示す通り MOX 燃料の中心温度は妥当に評価される。以上より、MOX 燃料の中心温度は MOX 燃料の特徴を考慮することにより UO_2 燃料と同様に評価できることを確認した。。

・内圧変化:　図 3 に MOX 燃料棒の内圧履歴を示す。同図の通り燃料棒燃焼度約 25 および 40GWd/t 前後において高出力(局所最大線出力約 30kW/m　40GWd/t)で照射されており、内圧上昇が見られる。これは燃料温度が高いため、FP ガス放出によると考えられる。尚、同様な傾向は UO_2 燃料でも見られている。

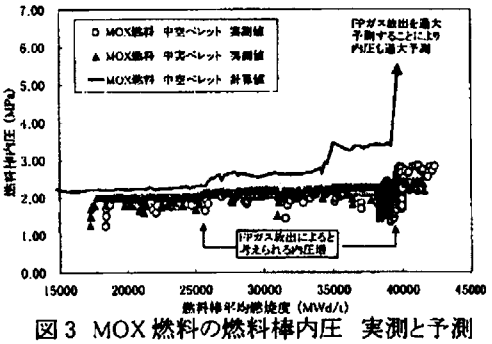


図 3 MOX 燃料の燃料棒内圧　実測と予測

UO_2 燃料の FP 放出モデルを仮定し MOX 燃料の内圧を評価した結果を図3に示す。同図から、内圧は保守的に評価されると共に内圧増加時期は適切に評価され、MOX 燃料の FP ガス放出についても UO_2 燃料と同様に評価できることが示唆された。

・ペレット焼きしまり/スエリング :　スタック長伸びデータから、MOX 燃料および UO_2 燃料スエリング率に大きな差異はなく、等方的な寸法変化を仮定すると一般的な固体スエリング率約 0.6%(ΔV/V)/(10GWd/t)と同程度であることを確認した。一方、MOX 燃料の炉内焼きしまり量は炉外再焼結試験結果と良い相関があることを確認した。

3. 結言　実機仕様の MOX 燃料について約 43GWd/t まで健全に照射されており、照射挙動データから、MOX 燃料の照射挙動はこれまで UO_2 燃料と大きな差異がないことを確認した。今後照射試験を継続し、更なる高燃焼度域での実証データを拡充し、照射挙動を検討していく。なお、本研究は PWR5電力、三菱重工業、原子燃料工業との共同研究で実施したものである。

(1)S.Doi, et al., ANS Mtg. Portland, Oregon Mar. 1997 , p46-53　(2)金杉ら、98 年秋の大会 I37,　(3)手島ら、00 年春の大会 K41
(4) 三菱原子力工業,"三菱 PWR の燃料棒設計計算コードの概要",S63.3 改 1　(5)三菱重工業"PWR/MOX 燃料機械設計",H10.11 改 3

日本原子力学会に転載許諾済み

3. HBWR における BWR 用混合酸化物燃料(MOX)の照射挙動に関する研究

Irradiation Test of BWR-MOX Pellets in HBWR

（日本核燃料開発）

3.1 研究目的

BWR 用 MOX 燃料をハルデン炉(HBWR)で照射し、その健全性を確認すると共に、燃料棒に取り付けた計装により照射中の燃料温度、FP ガス放出等、MOX 燃料の照射挙動評価に資するデータを取得する。

3.2 研究内容

BWR 用 MOX 燃料及び比較用の UO_2 燃料について、外径の異なる 2 種類の短尺燃料棒(外径約 12.3mm 及び約 11.2mm)を上部クラスタ及び下部クラスタからなる照射リグ 2 体に組み込み、炉内計装を取り付けて HBWR で照射を行う。照射リグの概念及び燃料棒配置を Fig.3-1 に示し、照射燃料棒の仕様を Table 3-1 に示す。照射リグ内の下部／上部クラスタには MOX ペレットあるいは比較・対照用の UO_2 ペレットが装荷された照射用短尺燃料棒がそれぞれ 6 本ずつ配置される。照射リグは 2 体（IFA-594/595）照射され、それぞれのリグには異なる外径のペレット（8×8 仕様、9×9 仕様）が装荷されている。照射中は燃料棒健全性を確認すると共に、リグには中性子検出器（ND）が計装される他、照射燃料棒には熱電対中心温度計（TF）、熱膨張中心温度計（ET）及び燃料棒内圧計（PF）が計装されており（Fig.3-1）、出力分布、燃料中心温度及び燃料棒内圧データがオンラインで取得される。

取得した計装データに基づいて各燃料棒の照射挙動を解析評価し、また、照射された燃料棒を照射後試験に供してさらに詳細な燃料ふるまいについての情報を取得する。

Table 3-1 照射条件及び燃料棒仕様

	MOX燃料	UO_2燃料
線出力(kW/m)	約40	
ウラン濃縮度(wt%)	劣化ウラン	11
Puf(wt%)	8	—
被覆管材質	ジルカロイ-2 (ジルコニウムライナ)	
被覆管外径(mm)	2種(約12.3及び11.2)	
被覆管厚さ(mm)	2種(約0.86及び0.71)	
有効燃料長(mm)	約300	
ペレット直径(mm)	2種(約10.4及び9.6)	
計装	燃料棒内圧計 熱電対 熱膨張温度計	

3.3 成果

平成7年7月7日の照射開始以後照射を継続し、平成10年11月に平均燃焼度約27GWd/tに達した時点で照射の前半部分（第1キャンペーン）を終了し、半数の燃料棒が照射後試験のために取り出された。この間、燃料棒内圧測定用差動トランスにいくつかに動作異常が発生し、その内IFA-594リグは装荷したMOX燃料棒用の3個が故障したため、燃料棒取り出し後の再装荷時（平成11年2月）に、新たに製作した取り替え用照射リグ（IFA-625）に交換した。照射リグ取り替え後、内圧データは復帰した。

炉心から取り出した燃料棒は照射後試験のために英国BNFLへ輸送された。平成11年4月から非破壊試験が実施され、2本のMOX燃料棒を対象とした破壊試験は平成12年度に終了した。

照射の後半部分(第2キャンペーン)は残り12本について平成11年3月4日より開始されたが、その後UO_2燃料棒2本が熱電対用端栓部のリークに伴い取り除かれたため、現在は10本が照射中である。平成14年9月11日現在の各リグのMOX燃料棒(下部クラスタ)におけるクラスタ平均燃焼度はIFA-625/594リグが51.1GWd/t、IFA-595リグが57.1GWd/t、また、UO_2燃料棒(上部クラスタ)については各々46.4及び50.4GWd/tである。Fig. 3-2に各リグの燃料棒平均線出力を示す。第2キャンペーン開始時に炉心内位置変更に伴ってMOX燃料棒、UO_2燃料棒ともに照射初期に相当する出力を再度経験していることと、最大経験出力はMOX燃料棒がUO_2燃料棒より数kW/m高いことが特徴である。今後も照射を計画通り継続すると共に、第2キャンペーンの照射後試験を平成16年度に実施する予定である。

IFA-594リグのMOX燃料棒で燃焼度約15GWd/tの時点において、FPガス放出に起因すると推定される内圧増加が観測され、同リグに装荷されたUO_2燃料棒及びIFA-595リグに装荷された燃料棒についても燃焼度約23GWd/tの時点で内圧増加が観測されたことは既に報告したが、第2キャンペーン開始時の高出力経験時にMOX、UO_2燃料ともに圧力が上昇し、その後も増加を続けている。

なお、一部燃料棒の熱膨張温度計の信頼性が低下していること、また、熱電対の劣化等により現在は熱電対温度計でのデータ採取が行われていないため、照射中の温度履歴に関わる情報が不足しているのが現状である。一方、第1キャンペーンでの燃料中心温度計測データに基づいて、UO_2燃料とMOX燃料の間で燃料温度を決定する要因の比較を行った結果、UO_2燃料における熱伝導率の燃焼度依存性に関しては現在の評価手法がほぼ妥当なものであることを確認し、MOX燃料の熱伝導率の燃焼度依存性はUO_2に比べて小さいと判断された。このため、本照射試験の最後のサイクル(平成15年度)において、再度燃料棒温度特性を確認するため、現在照射中の燃料棒の中から3本を選択して、熱電対燃料中心温度計を再計装し、燃料中心温度測定を実施することとした。

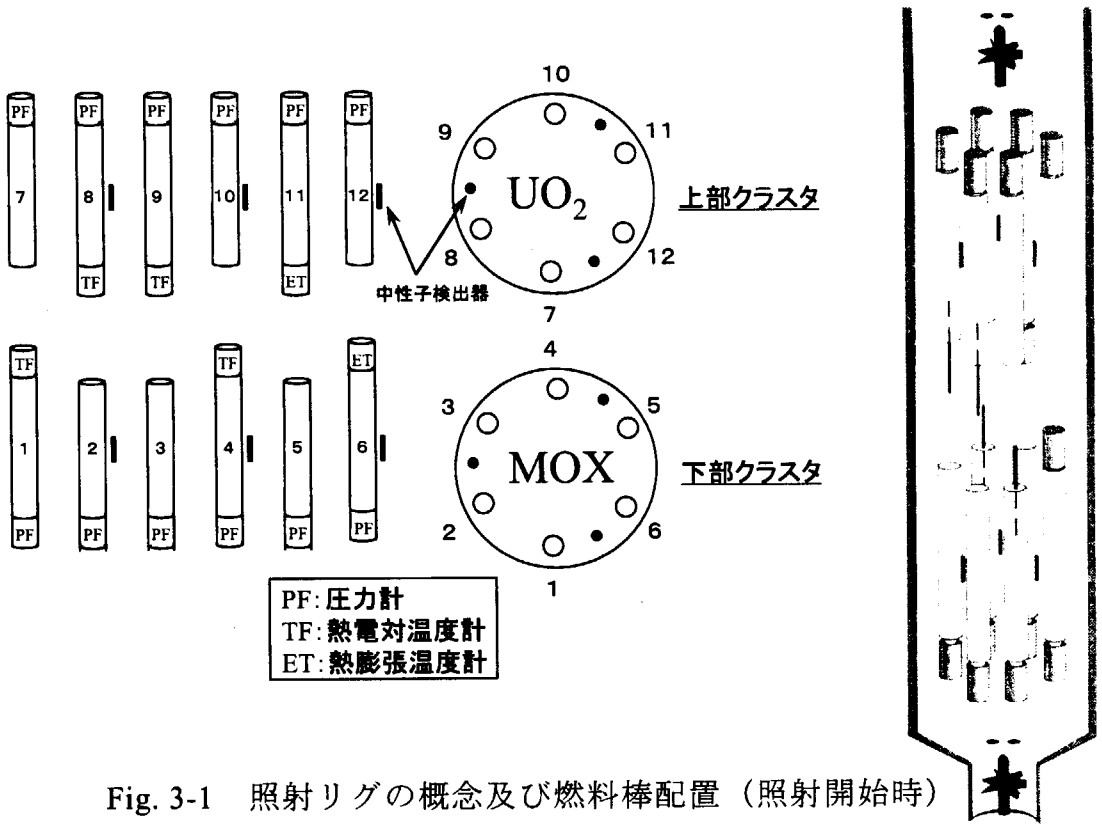


Fig. 3-1 照射リグの概念及び燃料棒配置（照射開始時）

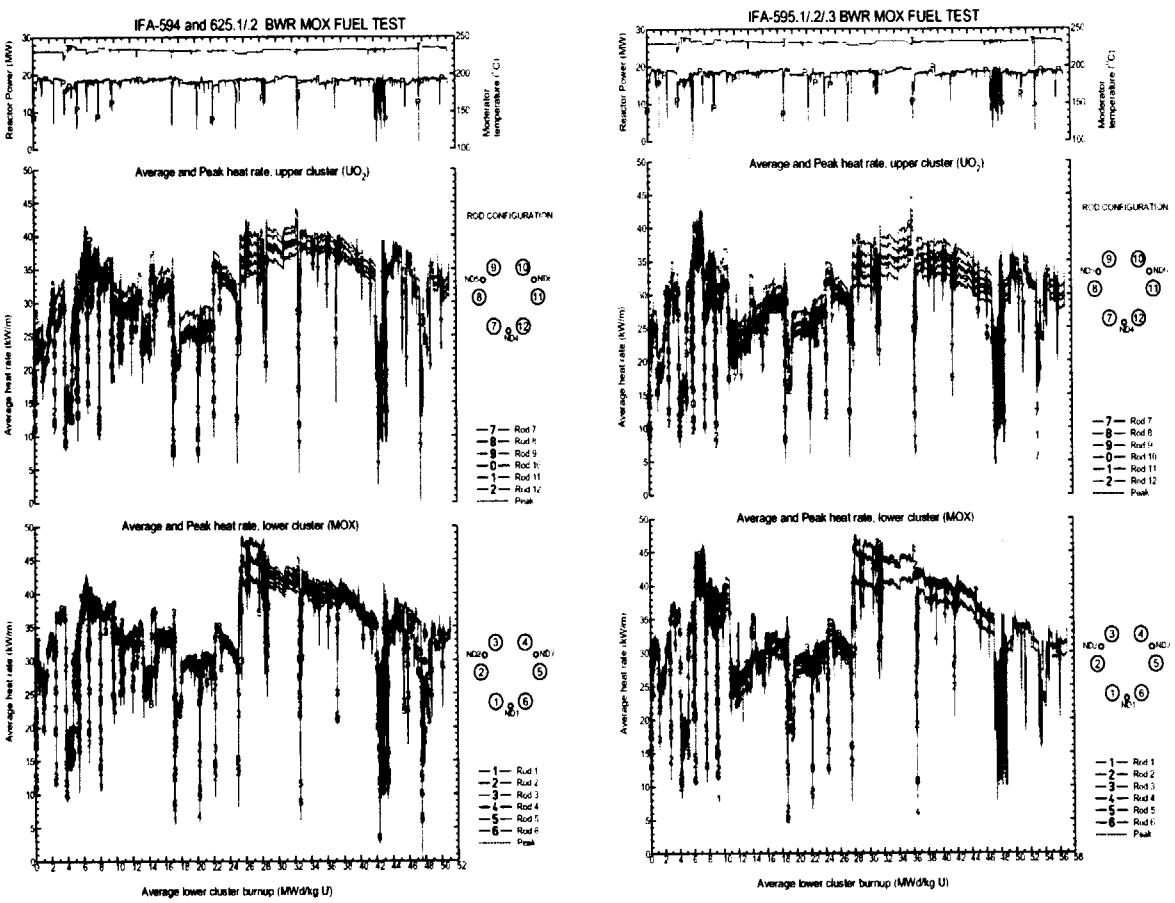


Fig. 3-2 IFA625/594及びIFA595リグ各燃料棒の平均線出力

4. ＨＢＷＲにおけるＢＷＲ用改良燃料の照射挙動に関する研究

Irradiation Study of Advanced BWR Fuel in HBWR

（原子燃料工業㈱）

4.1 目的

大幅高燃焼度燃料用材料として開発してきた大粒径ペレットを計装付き試験燃料棒に装荷してHBWR条件で照射試験を行い、照射中の燃料棒内圧、中心温度等の挙動を測定することにより性能を確認する。

同時に、耐食性を改良した被覆管をBWR条件を模擬した照射リグを使用して照射試験を実施し、その性能を確認する。

4.2 内容

計装付き試験燃料集合体としてIFA-602（下部クラスター８本、上部クラスター４本）を使用して、ハルデンHBWR条件で照射試験を行い、数種類の大粒径ペレットについて、照射中の燃料棒内圧、中心温度等の挙動を測定することにより性能を確認する。

また一部の燃料棒には耐食性を改良した被覆管を用い、ＢＷＲ条件下での照射試験をIFA-603および604（各２本）を使用して実施し、その性能を確認する。

試験に供したペレットおよび被覆管の種類、燃料棒の構成をFig. 4-1に示す。

IFA-602はHBWR条件下で約80GWd/tUまで照射する計画であり、現在照射を継続している。IFA-603/604についてはBWR条件下で約60GWd/tUまで照射がまもなく終了し、外観検査及び渦電流探傷試験を行い、それに続いて照射後試験を実施する計画である。

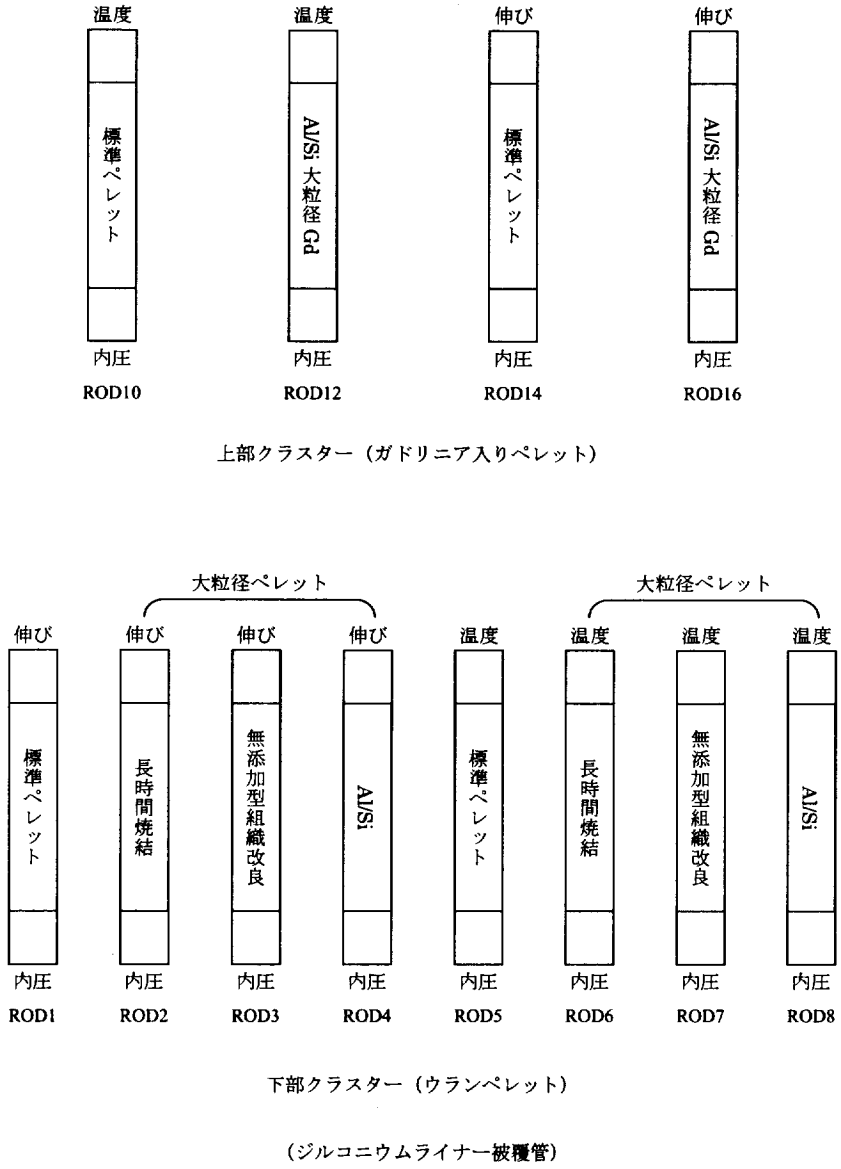
4.3 成果

各リグの照射は、1995年1月2日から開始され、2000年10月26日時点でIFA-602の下部ｸﾗｽﾀｰが平均燃焼度で約62GWd/tU、上部クラスターが約53GWd/tUに達している。また、IFA-603とIFA-604は、約54GWd/tUに達している。

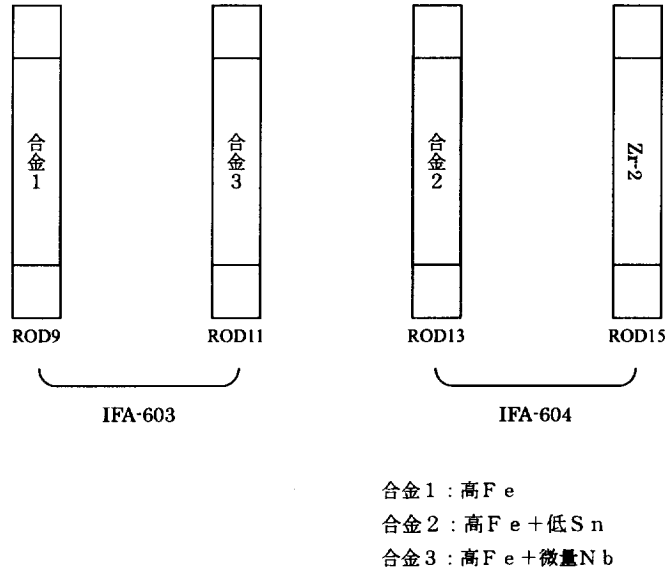
IFA-603/604で照射されている燃料棒4本に対しては1998年12月に第2回目の外観観察および渦電流探傷(EC)による非破壊検査を実施しており、改良合金の一様腐食性が現行被覆管と同様に良好であることを確認している。

IFA-602に取り付けられた計装による内圧測定の結果、Fig.4-2に示すように平均燃焼度約45GWd/tU時点で焼結雰囲気調整法ペレットおよび長時間焼結法ペレットが、標準UO_2ペレットに比べ低いFGRを示している。その後は出力が低い状態での運転が続いており、顕著なFPガス放出が生じていない。

IFA-603および604については現在照射試験の継続中であり、2000年10月26日の段階では、Fig.4-3に示すような燃焼度履歴となっている。



(a) IFA-602 の燃料棒の種類と計装の構成



(b) IFA-603,604 の燃料棒の種類

Fig. 4-1 燃料棒の構成と計装の種類

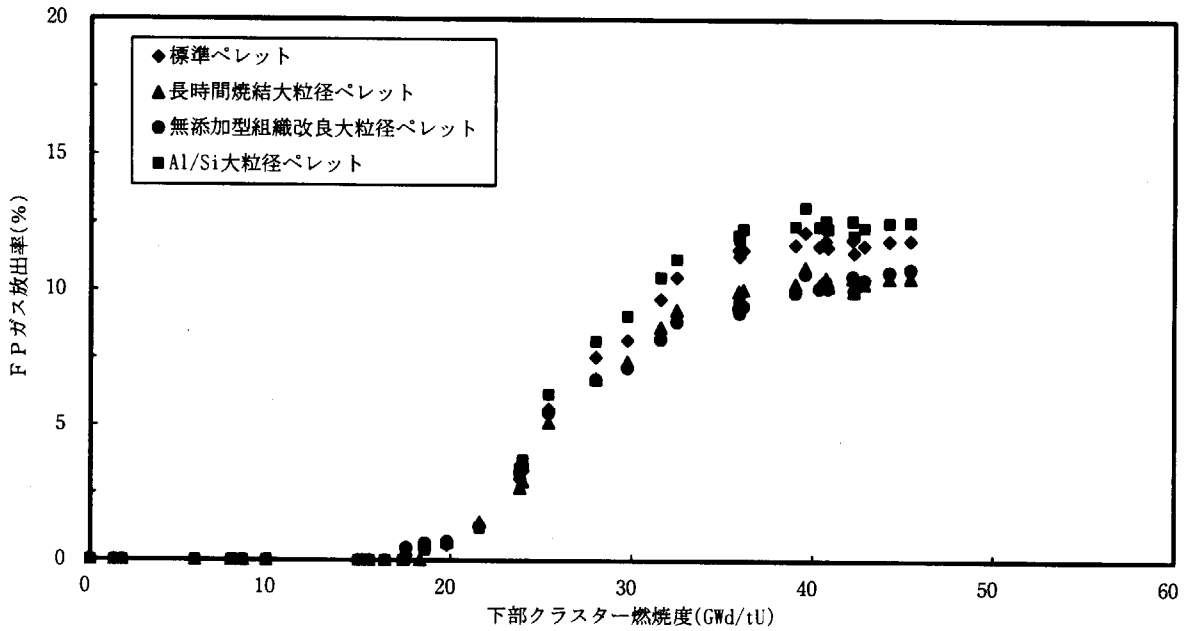


Fig.4-2 下部クラスター平均燃焼度 46GWd/tU までの IFA-602 下部燃料棒の FGR の比較

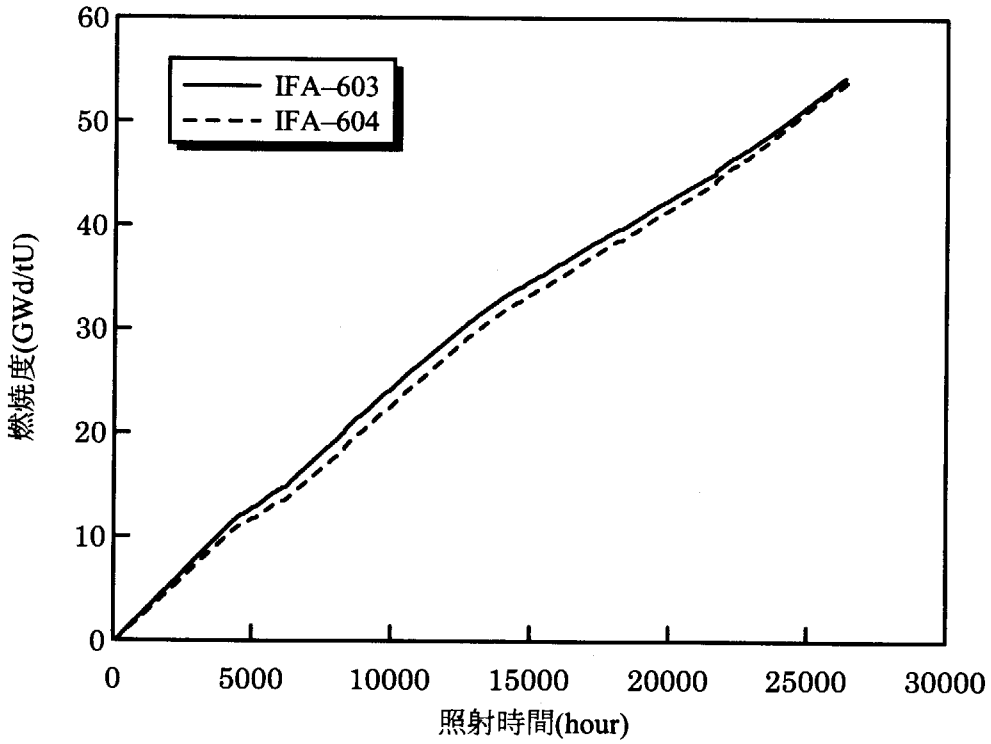


Fig.4-3 IFA-603/604 の平均燃焼度履歴

5. 高燃焼度ＰＷＲ改良被覆管燃料棒のＨＢＷＲにおける照射試験

High Burn-up PWR Irradiation Test of Improved Clad in HBWR

（(財) 原子力発電技術機構）

5.1 研究目的

ＰＷＲ高燃焼度改良被覆管（Ｂ型）の短尺燃料棒及び被覆管試験片をハルデン炉にて約６年間（目標燃焼度 55GWd/t）照射し、高燃焼度時の燃料挙動データを取得する。これにより、同被覆管の健全性を確証するとともに、炉内腐食特性に関するデータを取得する。また、同被覆管の耐ＰＣＩ性能を評価するために、照射済燃料棒について出力急昇試験を実施する。

5.2 研究内容

短尺燃料棒（8 本）及び被覆管試験片（44 個）を、ハルデン炉内に設けたＰＷＲ条件を模擬したループに装荷して（Fig.5-1）照射試験を行う。短尺燃料棒には、燃料棒伸び及び燃料棒内圧測定の計装を取付け、照射中データを採取する。短尺燃料棒及び被覆管試験片は、約１年毎に取出して外観観察等の非破壊試験を実施し、被覆管試験片については金相試験等の破壊試験を実施する。また、中間燃焼度（約 20GWd/t、約 35GWd/t）及び高燃焼度（約 55GWd/t）の短尺燃料棒合計７本について、出力急昇試験を行う。

5.3 成果

5.3.1 照射中データ採取

①ハルデン炉照射中の燃料棒線出力履歴を Fig.5-2 に示す。2001 年 10 月末の照射終了時点で、燃焼度約 55GWd/t を達成した。

②出力運転時における燃料棒伸びの燃焼度依存性を Fig.5-3 に示す。燃料棒伸びは、燃焼の進行とともに増加し、かつ、その変動は線出力の変化に対応している。なお、大粒径ペレットと通常ペレットの燃料棒伸びに若干の差が認められた。

③出力運転時における燃料棒内圧の燃焼度依存性を Fig.5-4 に示す。内圧は、燃焼の進行とともに上昇し、かつ、その変動は線出力の変化に対応している。

5.3.2 燃料棒照射後試験

①寸法測定、パンクチャー試験等により、燃焼度約 55GWd/t までの燃料棒健全性を確認した。

②出力運転時燃料棒内圧測定値から求めたＦＰガス放出率をパンクチャー試験結果と対比して Fig.5-5 に示す。両者は、良い一致を示す。ＦＰガス放出率の増加は、ペレット中心温度計算値が Vitanza のしきい値を超える時点と対応している（Fig.5-6 参照）。

③ＥＣＴ及び金相試験による酸化膜厚さ測定の結果、燃焼度約 55GWd/t までの改良被覆管の耐食性は、低すず被覆管と同等以上であることを確認した（Fig.5-7 参照）。

5.3.3 被覆管試験片破壊試験

炉内腐食試験結果をもとに、低すずZry-4及び改良被覆管の酸化モデルを作成した。

5.3.4 出力急昇試験

次の条件での出力急昇試験で、全ての燃料は、破損しなかった（Fig.5-8参照）。

局所燃焼度	到達線出力	線出力変化幅	本数
約22GWd/t	約440W/cm	約150W/cm	2本
約37GWd/t	約410W/cm	約120W/cm	2本
約55GWd/t	約410W/cm	約120W/cm	3本

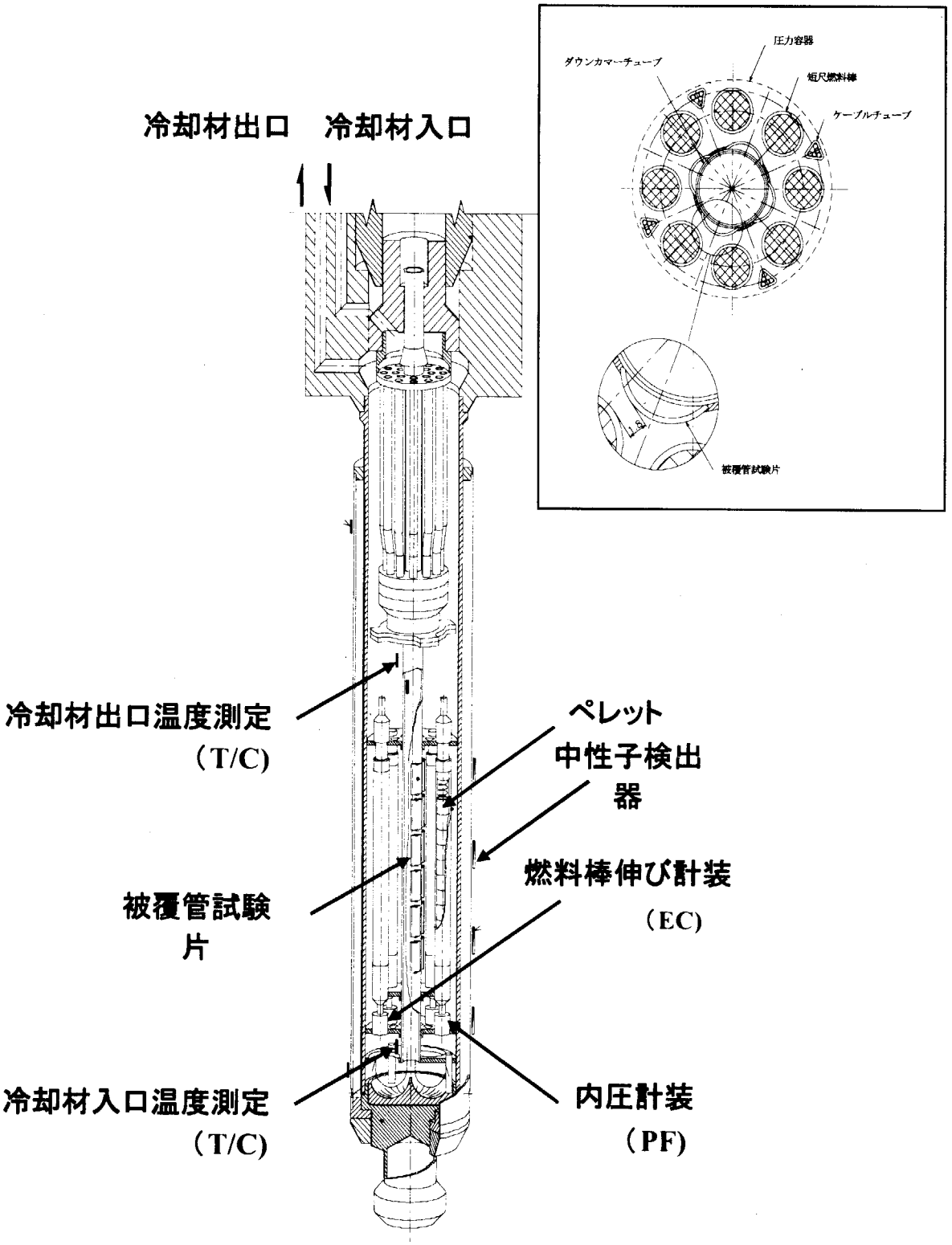


Fig.5-1 照射リグ概念図

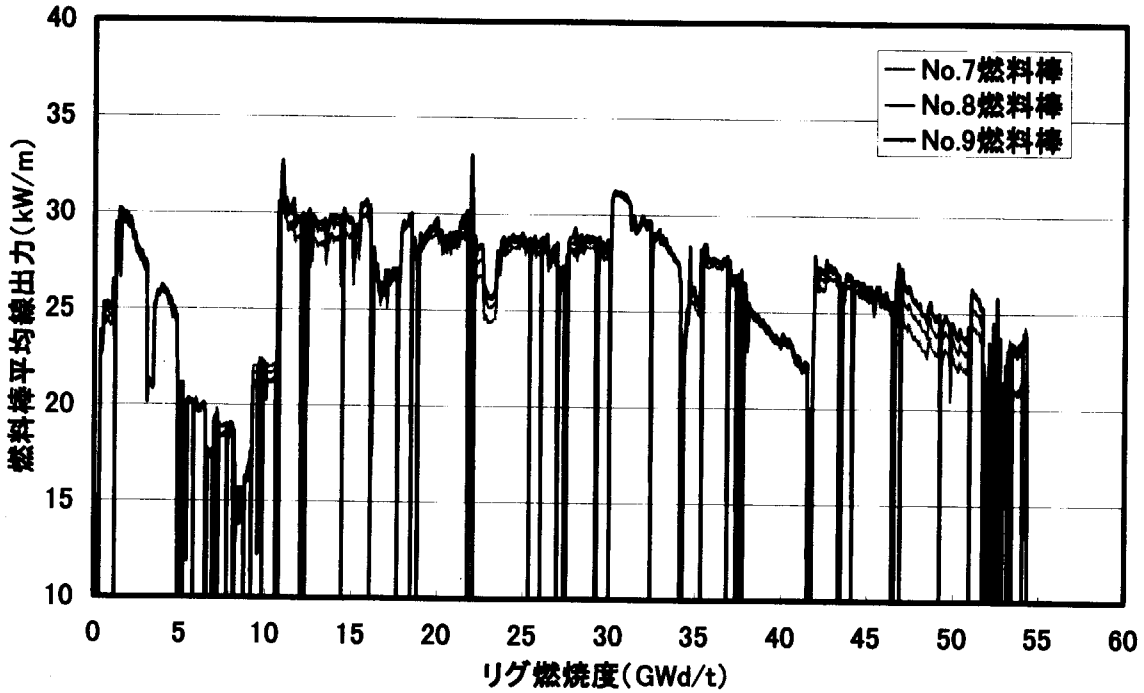


Fig.5-2 燃料棒線出力履歴

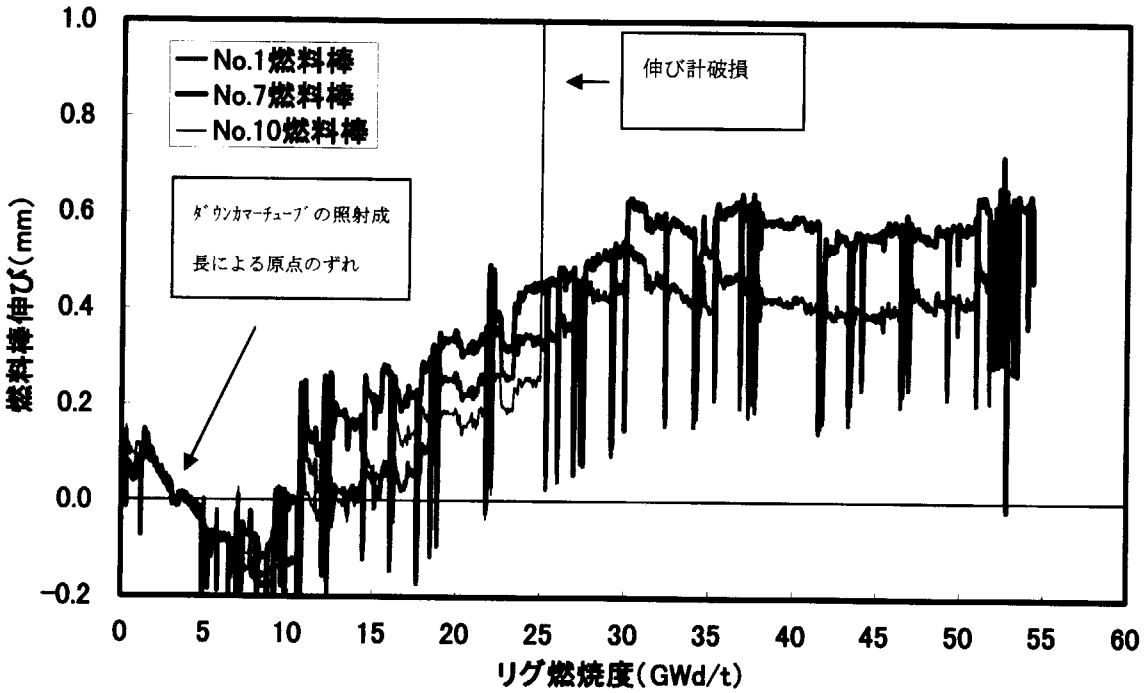


Fig.5-3 燃料棒伸びの変化

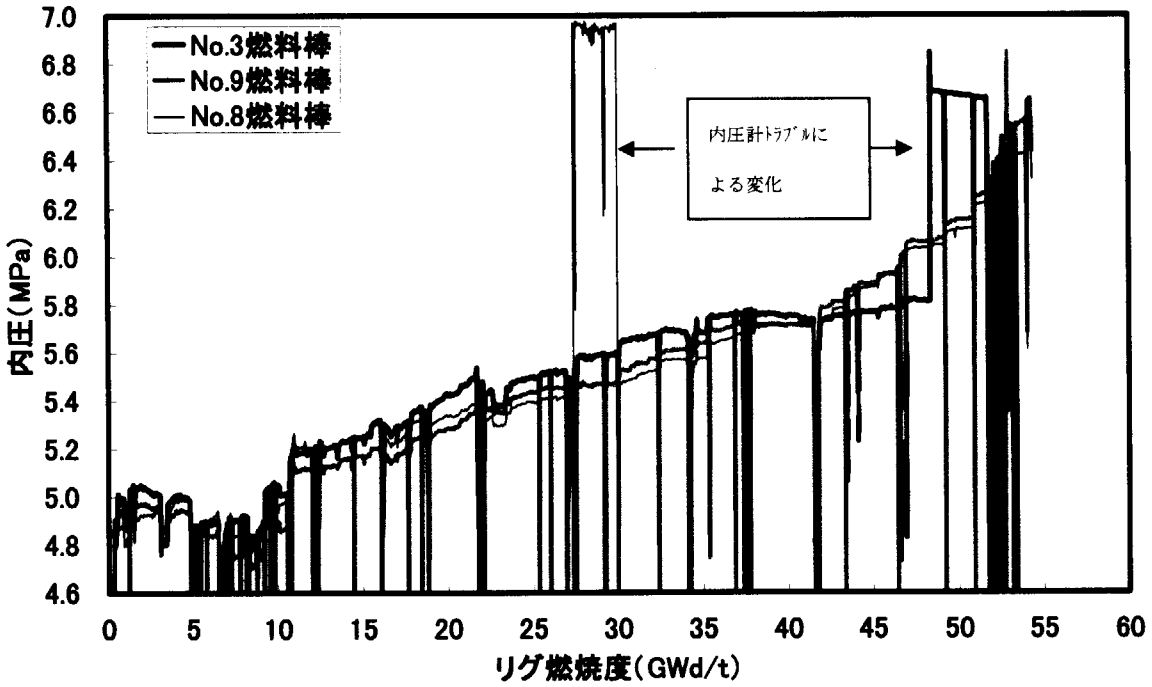


Fig.5-4 燃料棒内圧の変化

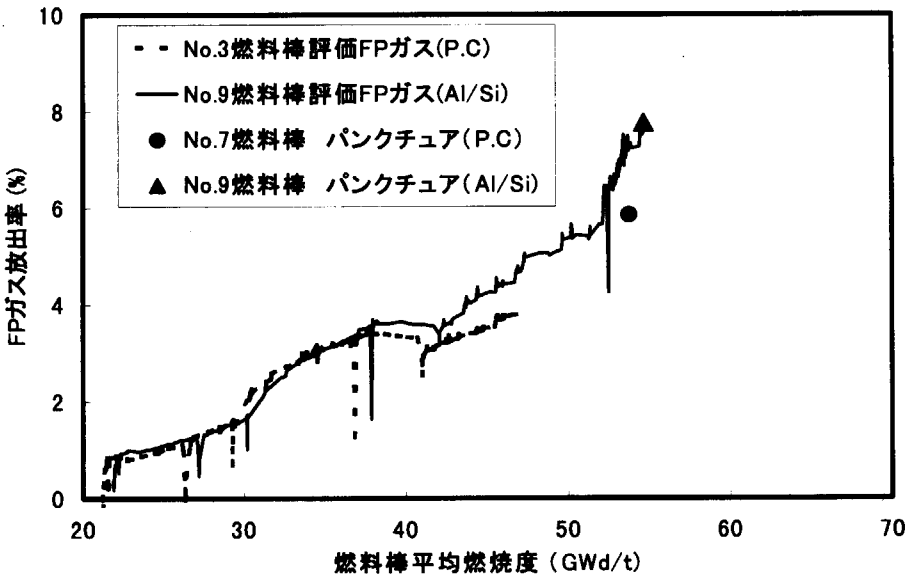


Fig.5-5 FPガス放出率の変化

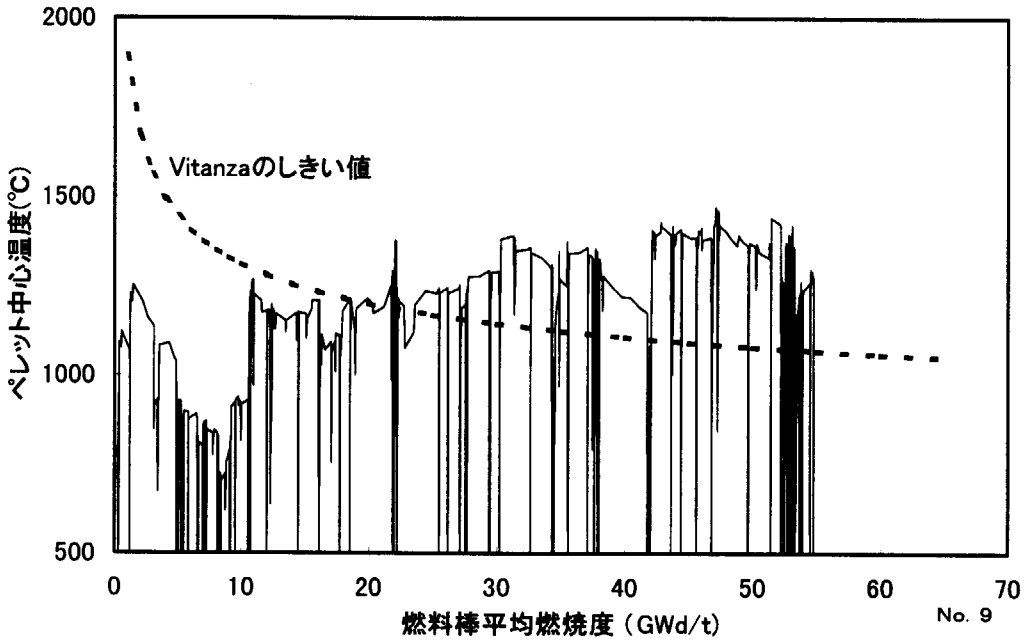


Fig.5-6 ペレット中心温度としきい値

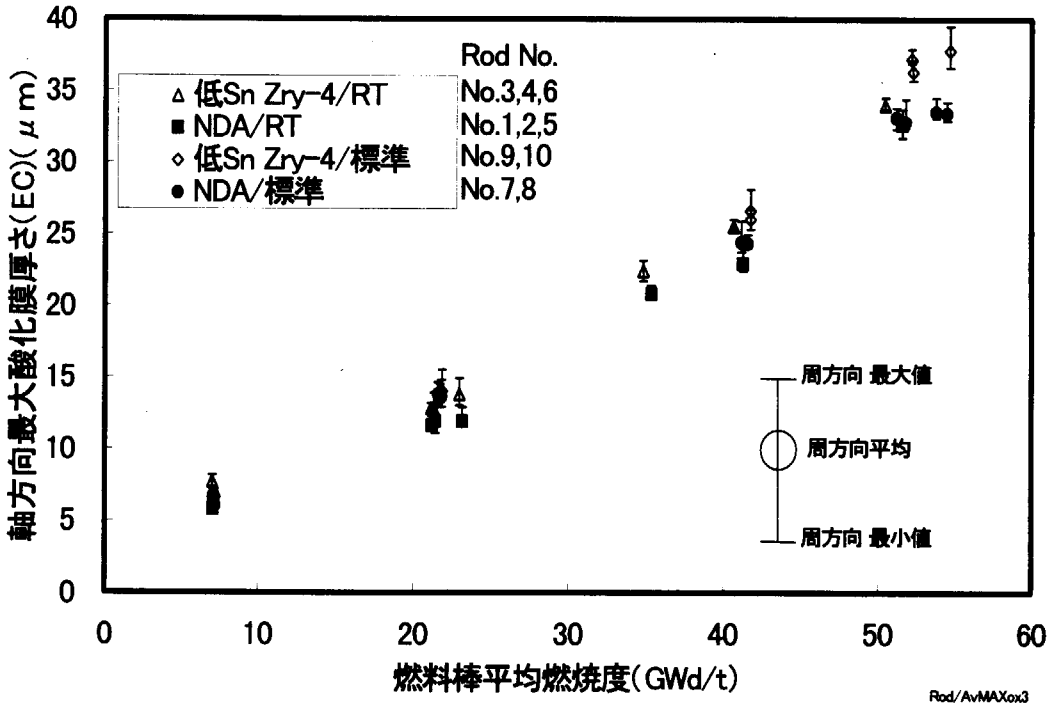


Fig5-7 最大酸化膜厚さの燃焼度変化

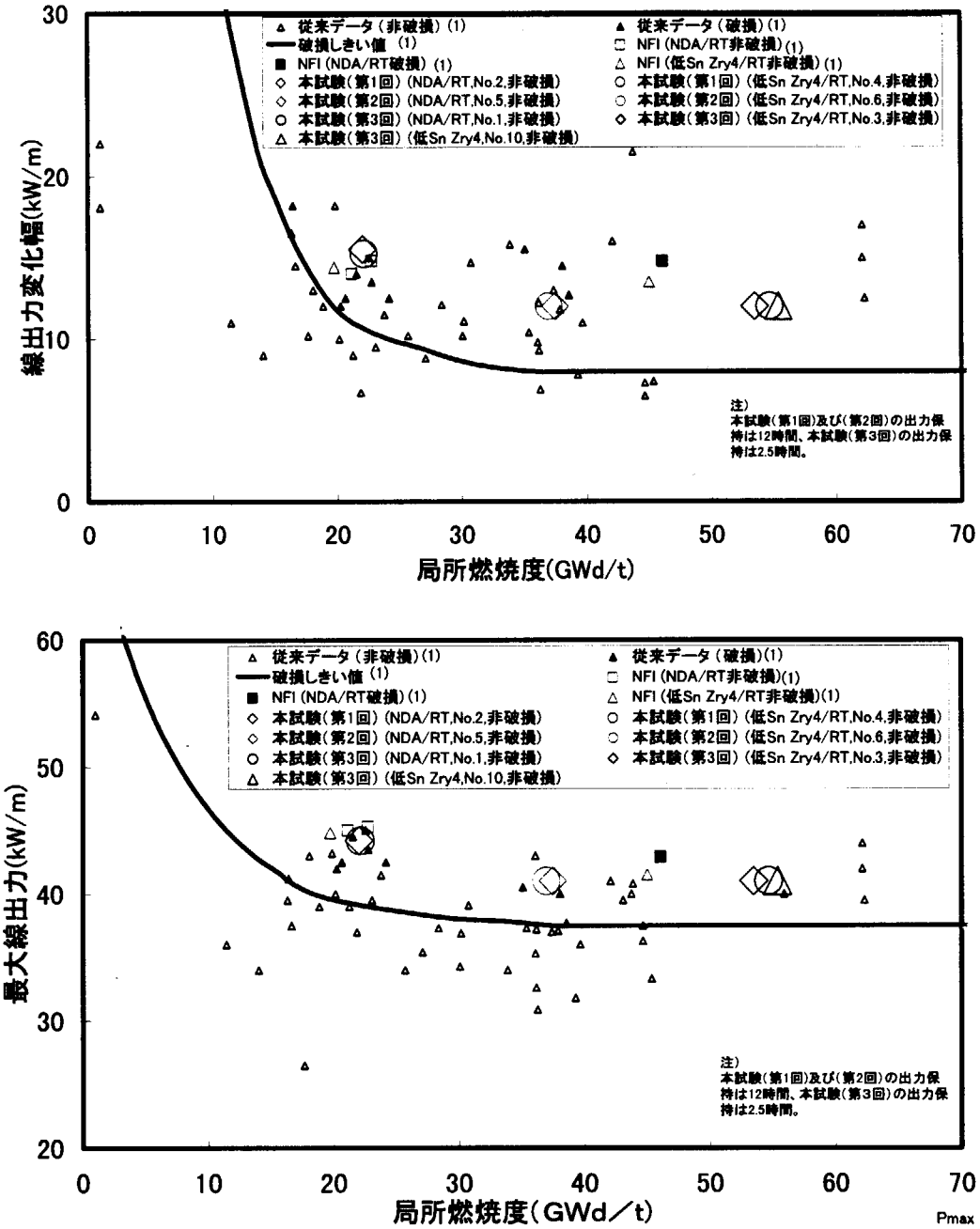


Fig.5-8 出力急昇試験結果

6．HBWRにおける過渡沸騰遷移挙動の照射研究

Irradiation Test of Fuel Behavior under Transient Boiling Condition in HBWR

(東京電力)

6.1 研究目的

BWR の過渡沸騰遷移に関する検討は、安全評価の事象分類の議論と併せて進められてきており、BWR照射環境下における実験データの取得が望まれている。このような観点から、HBWRにおいて BWR 燃料被覆管を用いた過渡沸騰遷移試験を行い、流量コーストダウン及び流量振動条件下において沸騰遷移事象を生じさせ、オンラインで被覆管温度や伸びのデータを採取した。さらに、沸騰遷移を経験した同燃料を照射後試験に供し、データを採取する。

以上の試験により、実際の燃料照射環境下における過渡沸騰遷移現象の確認を行うと共に、照射試験及び照射後試験による燃料挙動の解明を図り、本現象に対する体系的な知見の収集を図る。

6.2 研究内容

（1）ヒートアップ試験

これまで、HBWR で過渡沸騰遷移試験を行い照射後試験を行った。いくつかの被覆管はかなり厳しい過渡沸騰遷移を受け、被覆管にはβ相が観察されたが、燃料破損は生じていないことを確認した。

ここでは、過渡沸騰遷移中、被覆管はどの程度の温度上昇を経験したのかを調べるため、未照射被覆管を用いて温度－時間のヒートアップ試験を行い、相変態の状況を確認する。

ヒートアップ試験装置の概要を Fig.6-1 に示す。ガラス管の中にジルカロイ２製被覆管試料を入れ、ガラス管の外から誘導コイルで加熱し、目標温度に到達後、水もしくはヘリウムで急速冷却する。被覆管試料の温度挙動を Fig.6-2 に示す。加熱については、250℃から 980～1150℃まで約 60 秒で行い、冷却については、水冷却の場合 100℃まで 0.5 秒以下、ヘリウム冷却の場合 600℃まで 5 秒以下である。

（2）照射後試験

HBWR で過渡沸騰遷移試験を行った燃料のうち、沸騰遷移の厳しかった箇所について照射後試験（金相、引張試験、硬さ試験）を行い、被覆管の材料特性を調べる。

6.3 成果

（1）ヒートアップ試験

試験結果を Table.6-1 に示す。ピーク温度 1030℃以上/ホールド時間 5 秒の場合、すべての被覆管試料でβ相が観測され、ピーク温度 1030℃未満ではα＋β混合相が観測された。以上より、HBWR で過渡沸騰遷移試験を行った燃料のうちβ相が観察された被覆管のピーク温度は、1030℃以上と推定された。

（2）照射後試験

厳しい沸騰遷移を経験しβ相が観察された燃料について照射後試験を行った。500～700℃程度の温度上昇を経験した被覆管の材料特性を調べ、以下の特徴が見られた。

- 引張試験の結果、引張強さが低下し、破断伸びが大きくなった。また、破断面は延性破面を呈していた。
- 硬さの低下が見られた。

Table.6-1 ヒートアップ試験結果のまとめ

被覆管ピーク温度（℃）	250℃以上を経験した時間(秒)	ピーク温度でのホールド時間(秒)	冷却材	相状態
1120	70	5	ヘリウム	β
1100	60	0	水	β(+α)
1070	70	5	水	β
1040	70	5	水	β
1030	60	5	水	β
1020	60	5	水	β(+α)
1010	65	8	水	α+β
980	60	5	水	α+β

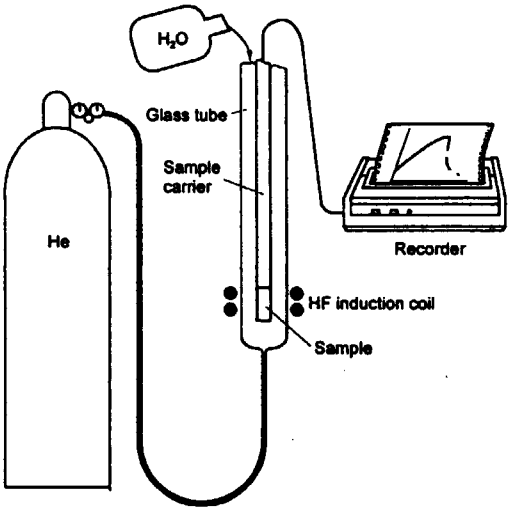


Fig.6-1 ヒートアップ試験装

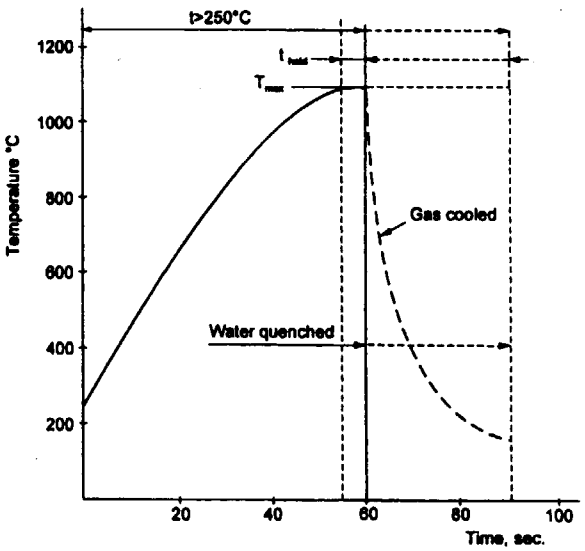


Fig.6-2 被覆管温度測定結果

7．HBWR による高燃焼時の軽水炉燃料挙動に関する研究

Study of High Burnup LWR Fuel Behavior based on HBWR Data

((財)電力中央研究所)

7.1 研究目的

軽水炉の燃料挙動を、最新の知見に基づいた解析手法により評価するため、ハルデン炉で照射した燃料棒の計装データを利用し、UO_2 燃料および MOX 燃料の挙動解析コードを改良する。

7.2 研究内容

(1)高燃焼度燃料の熱伝導率モデル構築

電力中央研究所が主催した国際共研 HBRP(High Burnup Rim Project)で取得したレーザーフラッシュ法による炉外熱拡散率測定データを基に構築した熱伝導率モデルについて、これを既存の燃料挙動解析コードに組み込み、ハルデン炉で照射した燃料棒の炉内計装データ等を用いて実炉に対する適用性の確認を進めた。

(2)燃料挙動解析コードの改良

ハルデン炉試験データおよび炉外試験の燃料材料、被覆管等の個別試験データから得られた最新のモデルを統合し、燃料挙動解析コードを高燃焼時の燃料挙動を再現できるように改良を進めた。改良された解析コードについてデータとの整合性を基にその性能を検証を進めた。

7.3 成果

HBRP で測定した炉外熱拡散率データを基に、高燃焼度まで評価できる UO_2 マトリックスの熱伝導率モデルを構築し、燃料挙動解析コードに組み込んだ。

ハルデン炉において、高燃焼度まで、炉内計装を用いて燃料中心温度を測定した照射リグ IFA-562（90.5MWd/kgU）と IFA-597（61.3MWd/kgU）を解析対象として選択した。

これらの燃料棒の照射挙動を燃料挙動解析コードを用いて計算し、計算結果を測定値と比較検討した。その結果、当該データの範囲内で、熱伝導率モデルの妥当性が確認され、モデル組み込みで改良された燃料挙動解析コードの温度予測性能が検証された。詳細は以下の通りである。

(1) ハルデン炉計装付き細径燃料棒を用いた照射リグ IFA-562 で得られた、燃焼度 90.5MWd/kgUO_2 までの燃料中心温度と燃料棒内圧の履歴データの解析を、HBRP 熱伝導率モデル（Kitajima 相関式）を組み込んだ燃料挙動解析コード EIMUS を用いて実施し、燃料中心温度と内圧変化につき計算と測定値の比較を行った。

<u>燃料中心温度</u>

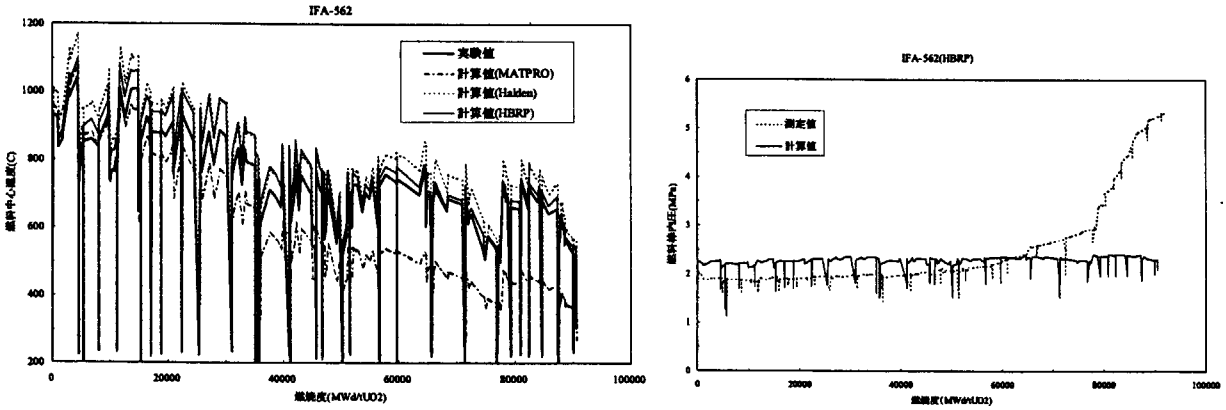
熱伝導率相関式を用いて計算した燃料中心温度は、全履歴を通して測定値と 100℃以内で一致しており、Halden モデルによる計算結果と比較しても測定値に近く、また温度フィードバックは起きていない。これにより、HBRP-Kitajima 相関式の妥当性を確認する

ことができた（Fig.7-1(a)参照）。

燃料棒内圧（FP ガス放出）

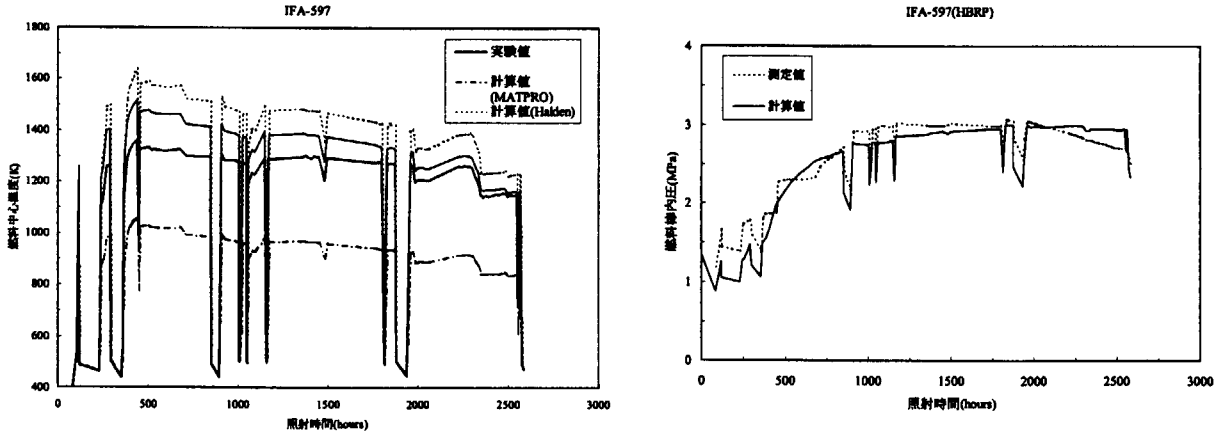
燃料棒内圧の測定値は、80MWd/kgUO_2 以上の高燃焼度で顕著な上昇を示す。一方計算されたガス放出は、燃料温度が実測値と計算値ともに 800℃以下に保持されるため僅かである（Fig.7-1(b)参照）。これにより現時点の燃料挙動解析コードでは、細粒化・リム組織を形成するしきい燃焼度より上ではガス放出を予測できないことが確認された。すなわち、大幅な高燃焼度時のガス放出については現時点でモデルが不十分である。結論として、リム組織の形成プロセスが関与する新たな FP ガス放出プロセスが存在している可能性が高く、今後はそのモデル開発のための実験と解析が望まれる。

(2) 実炉燃料棒の試験として、58.0MWd/kgUO_2 まで BWR で照射した燃料を再加工し 61.3 MWd/kgU まで継続照射した IFA-597 に対する燃料挙動解析を行った。その結果、Halden モデルによる計算値に比較すると実測値との差は小さいが、HBRP-Kitajima 相関式による計算値も、燃料中心温度測定値を上回っている（Fig7-2(a)参照）。この商用炉燃料に対しては、高燃焼時のペレット－被覆管ギャップモデルを検討する必要があることが示唆された。



(a) (b)

Fig. 7-1 IFA-562：(a)燃料中心温度、(b)燃料棒内圧に対する実測値と計算値の比較



(a) (b)

Fig.7- 2 IFA-597：(a)燃料中心温度、(b)燃料棒内圧に対する実測値と計算値の比較

8. HBWR における高価値制御棒供試体の照射試験
Irradiation Test of High-Worth Control Rod Material in HBWR

((株)日立製作所)

8.1 研究目的

全炉心に MOX 燃料を装荷した ABWR において、将来、高燃焼度燃料を採用した場合にも、適切な原子炉停止余裕を確保できるように開発されている高価値制御棒材の照射安定性を評価するための基礎データを取得する。

8.2 研究内容

供試体の中性子吸収棒は、全長以外を ABWR 用ボロンカーバイド型制御棒に用いられる中性子吸収棒と同一仕様とする。供試体は、内部管（B_4C 粉末を充填したステンレス鋼製中性子吸収管）と外部キャプセルで構成した二重管構造とし、管ギャップ内に He ガスを加圧充填することで軽水炉圧力及び温度を模擬した。照射供試体の仕様を Fig.8-1 に示す。試験リグは、上部/下部クラスタに ^{10}B 濃度をパラメータとした B_4C 粉末充填供試体をそれぞれ 6 本づつ配置した IFA-557、及びシングルクラスタに 6 本配置した IFA-548 を用いた（Fig.8-2）。試験リグには中性子検出器を計装し、^{10}B 燃焼密度評価のための中性子束計測を行う。また、供試体には内圧計または吸収管伸び計（1 供試体のみ）を計装し、吸収管内圧及び吸収管温度を計測する。また、照射した供試体は一定期間ごとに炉から取り出し照射後試験を行う。本試験は、電源開発(株)の委託を受け実施しているものである。

8.3 成果

(1) He 内圧

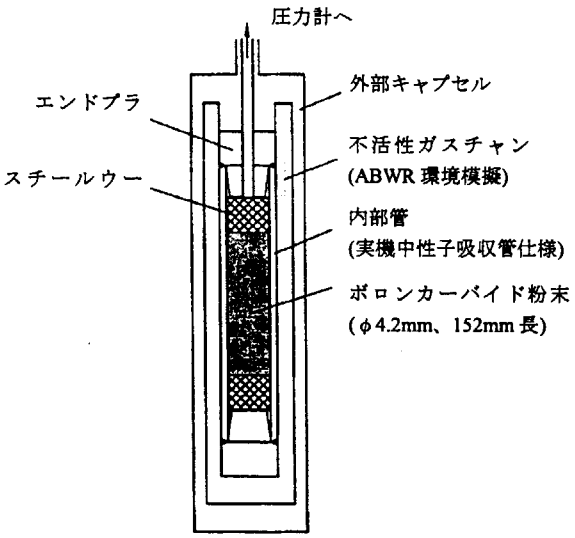
供試体内圧計データの評価から、He 放出率は照射とともに上昇し、^{10}B 濃度が高いほど He 放出率が高いことが分かった。また、パンクチャ試験で得たデータは、供試体内圧計データとよく一致していることを確認した。Fig.8-3 に、IFA-557 での全供試体出力の履歴を、Fig.8-4 に、He 放出率の照射時間に対する推移を示す。

(2) 金相観察

金相観察の結果から、^{10}B 濃度 50% B_4C では表層付近で細粒化している様子が認められた。Fig.8-5 に、^{10}B 濃度 50%供試体 B_4C 部の断面金相観察写真を示す。

(3) スエリング

供試体内部管の外径測定の結果から、内部管の直径スエリングは照射とともに増加することを確認した。Fig.8-6 に直径スエリングの照射時間依存性を示す。



項目	試験供試体仕様
^{10}B 濃度(at%)	天然(約 20)、約 50、約 80
粉末充填密度	70% T.D.
中性子吸収管	
材質	SUS304L
内径	約 4.2 mm
外径	約 5.6 mm
長さ	約 200 mm

Fig.8-1 供試体構造と仕様

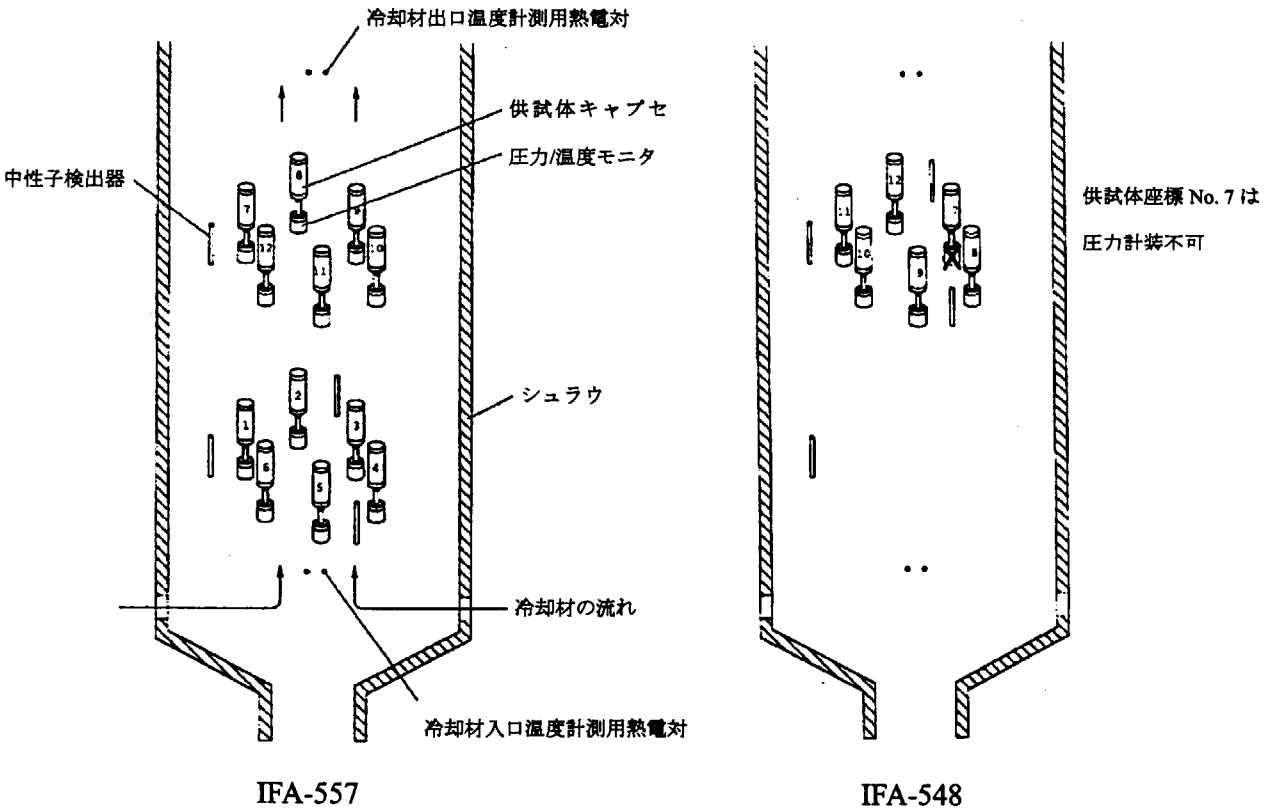


Fig.8-2 照射リグと供試体配

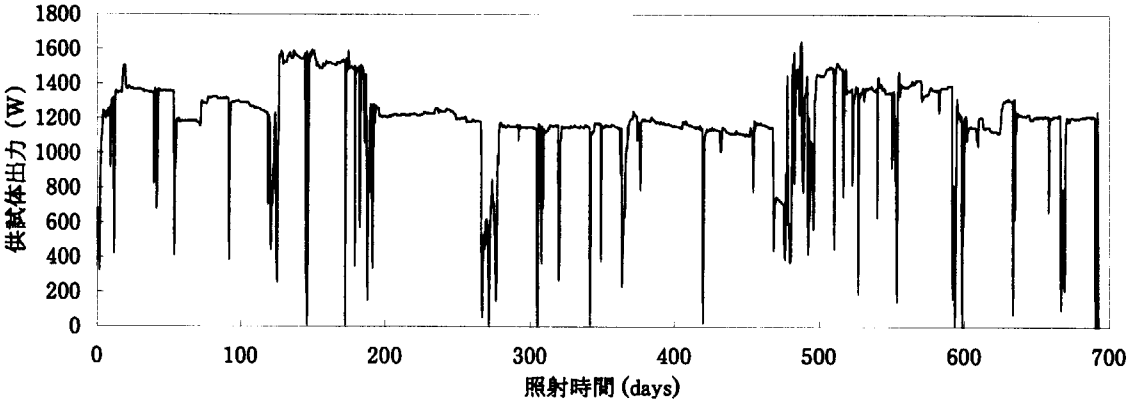


Fig.8-3 照射リグ IFA-557 における全供試体出力の履歴

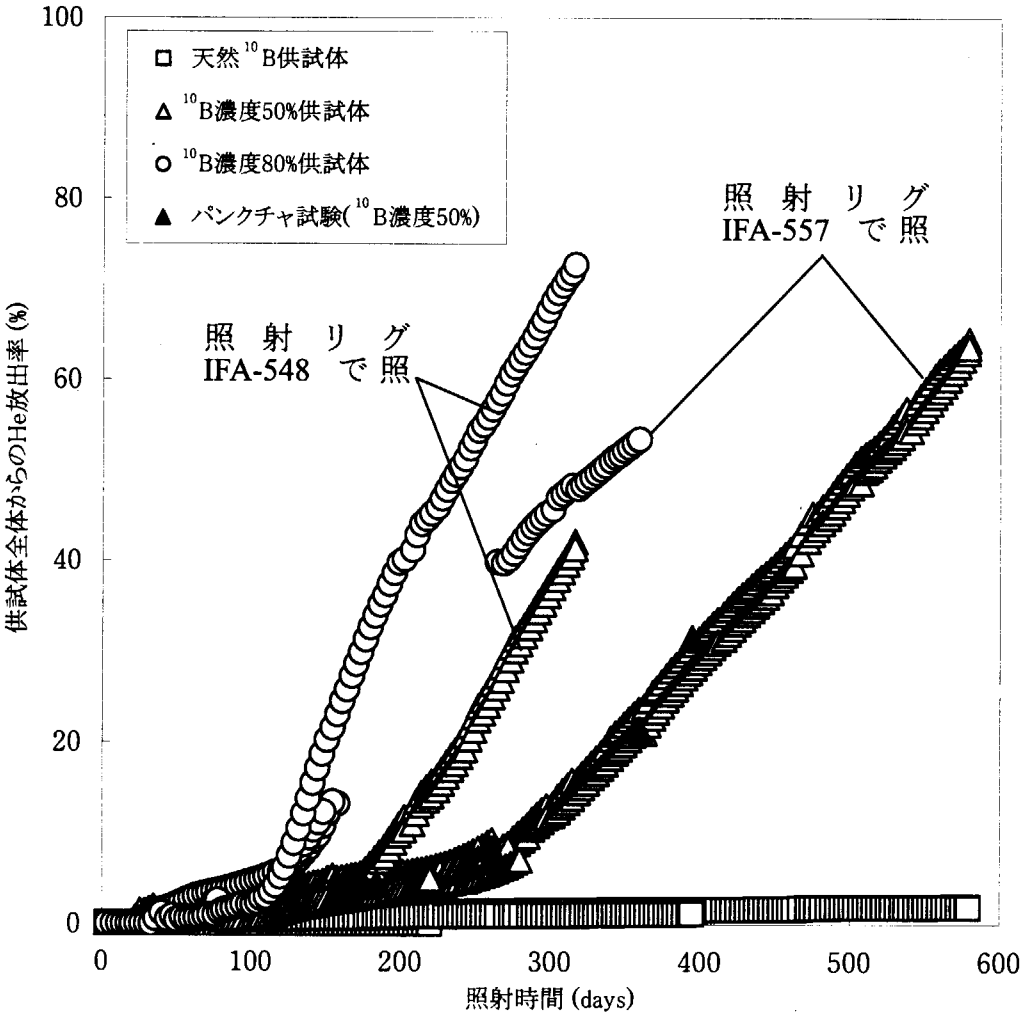


Fig.8-4 供試体照射時間と He 放出率（放出量/生成量）の関

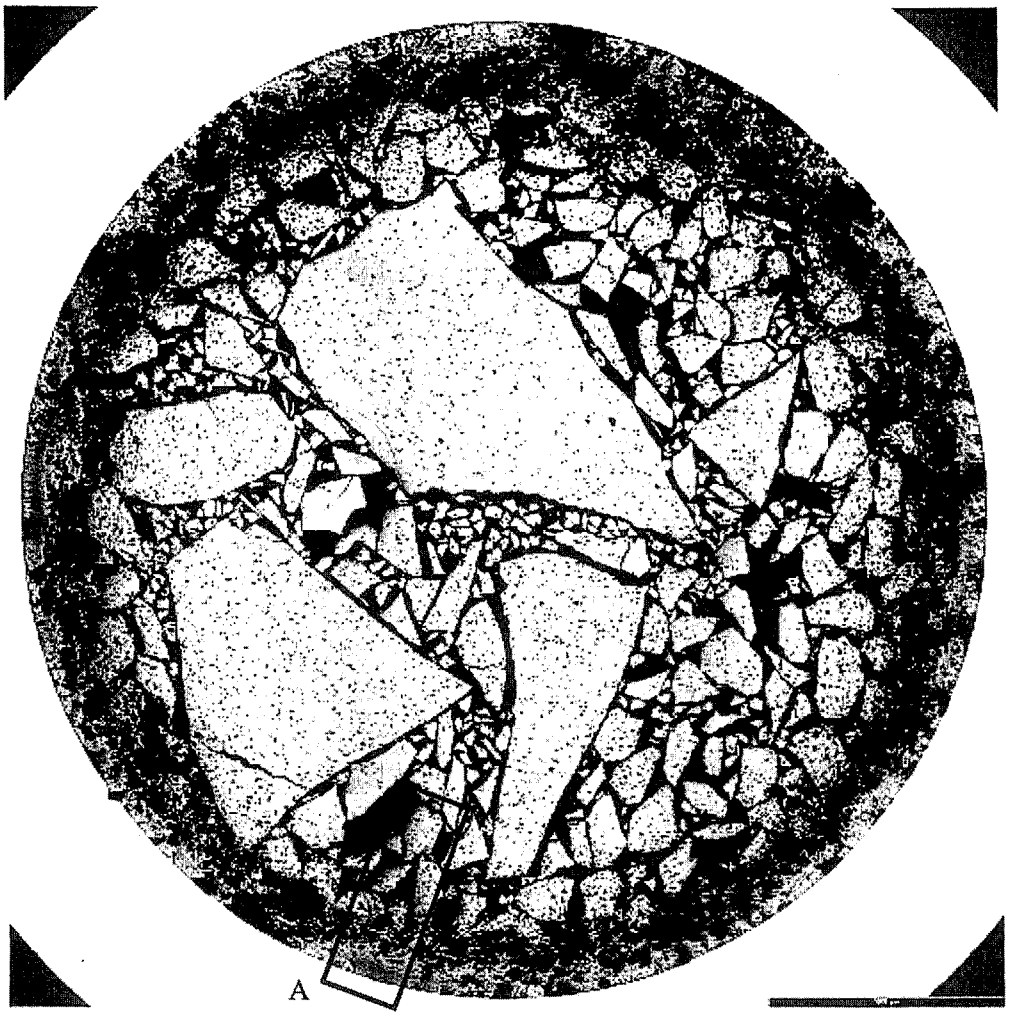


Fig.8-5(a) ^{10}B 濃度 50%供試体 B_4C 部の断面金相写真（マク

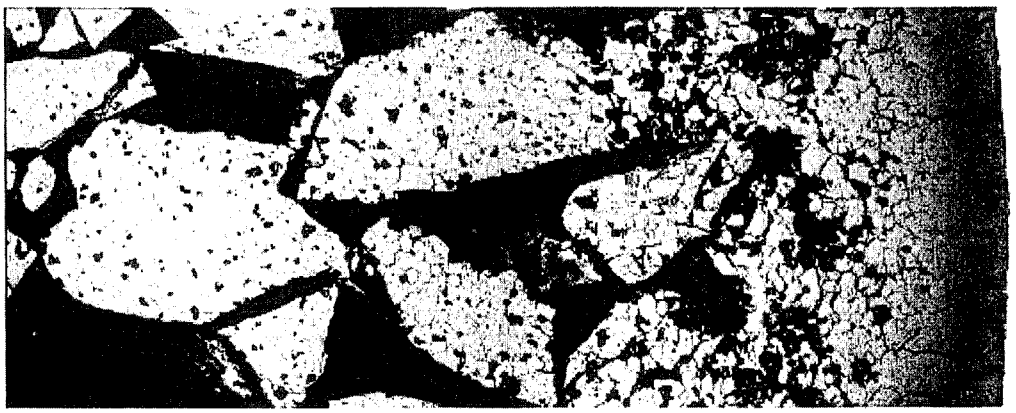


Fig.8-5(b) ^{10}B 濃度 50%供試体 B_4C 部の断面金相写真（A 部詳細：

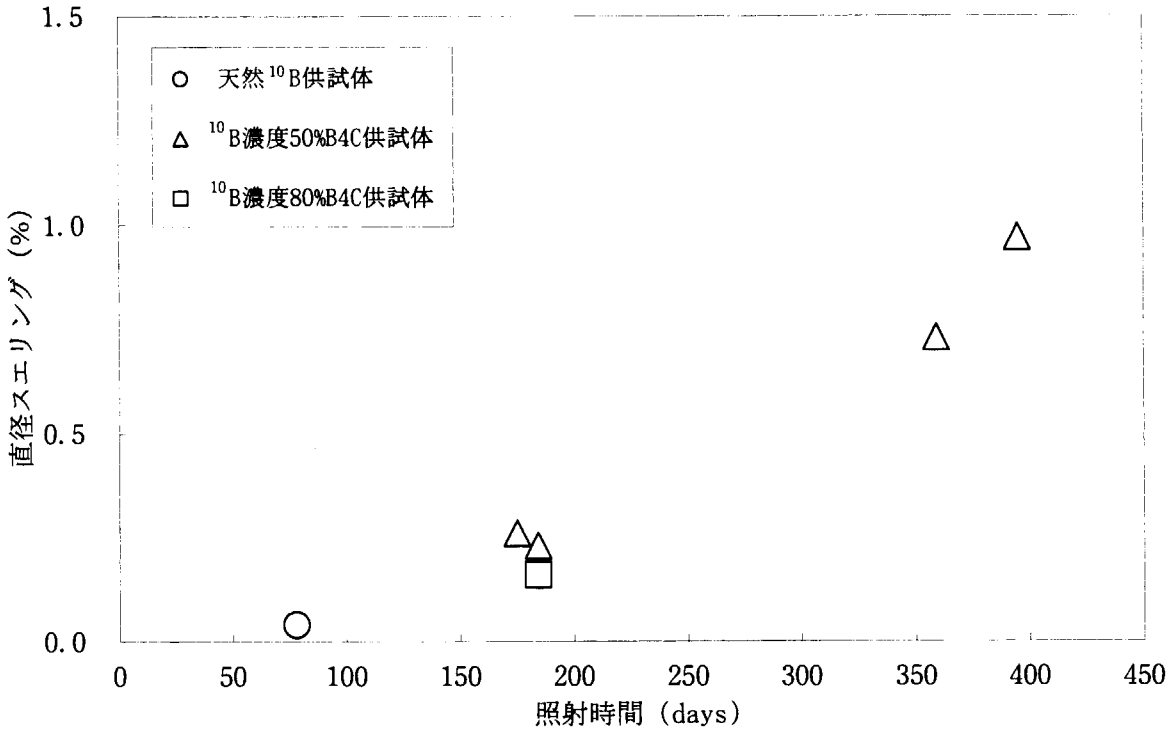


Fig.8-6　供試体照射時間と直径スエリングの関

9. 総　　括

一般に燃料照射研究は、計画の立案に始まり、試験燃料の製作、原子炉での照射、ホットラボでの照射後試験、試験結果の評価という手順を踏むため、研究成果を得るまでには長い時間を要する。さらに、最近は経済性向上のための高燃焼度化が強く指向されているため、開発研究としての燃料照射試験においても照射期間の長期化が一般化している。

今期、すなわち第12次協定の期間には、以下の7件のハルデン共同研究を実施した。

1. 混合酸化物燃料(MOX)の照射特性に関するハルデン炉での照射試験
   （三菱重工／日本原子力研究所）
2. HBWRにおけるBWR用混合酸化物燃料(MOX)の照射挙動に関する研究
   （日本核燃料開発／日本原子力研究所）
3. HBWRにおけるBWR用改良燃料の照射挙動に関する研究
   （原子燃料工業／日本原子力研究所）
4. 高燃焼度PWR改良被覆管燃料棒のHBWRにおける照射試験
   （原子力発電技術機構／日本原子力研究所）
5. HBWRにおける過渡沸騰遷移挙動の照射研究
   （東京電力／日本原子力研究所）
6. HBWRによる高燃焼時の軽水炉燃料挙動に関する研究
   （電力中央研究所／日本原子力研究所）
7. HBWRにおける高価値制御棒供試体の照射試験
   （日立製作所／日本原子力研究所）

このうちの2件、すなわち「高燃焼度PWR改良被覆管燃料棒のHBWRにおける照射試験」（原子力発電技術機構／日本原子力研究所）と「HBWRにおける過渡沸騰遷移挙動の照射研究」（東京電力／日本原子力研究所）は、所期の成果を得て終了した。残り5件の共同研究は、2002年1月から2005年12月を契約期間とする第13次ハルデン協定が締結されたことに伴い、共同研究契約を更新し研究を継続実施中である。

今期の共同研究により、MOX燃料や高燃焼度化に対応して開発された新型燃料の照射挙動等に関して有用な知見が取得された。

謝　辞

ハルデン共同研究は日本原子力研究所と国内諸機関が共同研究契約に基づいて実施している研究であり、OECD／ハルデン原子炉計画との密接な関連の下で進めているものである。国内外の多くの関係者の協力を得てはじめて実現できる研究であることは言を待たない。ここに本計画の運営や共同研究の円滑な遂行に対して御協力頂いた多くの方々に深謝する。

国際単位系（SI）と換算表

表1　SI基本単位および補助単位

量	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
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表2　SIと併用される単位

名称	記号
分，時，日	min，h，d
度，分，秒	°，′，″
リットル	l，L
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV=1.60218×10^{-19}J

1 u=1.66054×10^{-27}kg

表5　SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^{9}	ギガ	G
10^{6}	メガ	M
10^{3}	キロ	k
10^{2}	ヘクト	h
10^{1}	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

表3　固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s^{-1}
力	ニュートン	N	m·kg/s^2
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N·m
工率，放射束	ワット	W	J/s
電気量，電荷	クーロン	C	A·s
電位，電圧，起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	℃	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m^2
放射能	ベクレル	Bq	s^{-1}
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量等量	シーベルト	Sv	J/kg

表4　SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å=0.1nm=10^{-10}m

1 b=100fm^2=10^{-28}m^2

1 bar=0.1MPa=10^5Pa

1 Gal=1cm/s^2=10^{-2}m/s^2

1 Ci=3.7×10^{10}Bq

1 R=2.58×10^{-4}C/kg

1 rad=1cGy=10^{-2}Gy

1 rem=1cSv=10^{-2}Sv

（注）

1．表1～5は「国際単位系」第5版，国際度量衡局1985年刊行による。ただし,1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2．表4には海里，ノット，アール，ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3．barは，JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4．EC閣僚理事会指令ではbar，barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換　算　表

力	N(=10^5dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘　度　1 Pa·s(N·s/m^2)=10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度　1m^2/s=10^4St(ストークス)(cm^2/s)

圧力	MPa(=10bar)	kgf/cm^2	atm	mmHg(Torr)	lbf/in^2(psi)
	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10^7 erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	2.77778×10^{-7}	0.238889	9.47813×10^{-4}	0.737562	6.24150×10^{18}
	9.80665	1	2.72407×10^{-6}	2.34270	9.29487×10^{-3}	7.23301	6.12082×10^{19}
	3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}
	4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}
	1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}
	1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}
	1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1

1 cal= 4.18605J（計量法）

= 4.184J（熱化学）

= 4.1855J（15℃）

= 4.1868J（国際蒸気表）

仕事率　1 PS(仏馬力)

= 75 kgf·m/s

= 735.499W

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

（86年12月26日現在）

ハルデン炉を利用した日本の燃料照射研究 ―ハルデン共同研究（2000-02年）の成果―（共同研究）

R100
古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています