

# 「常陽」温度制御型材料照射装置の 性能評価

片岡 一 揃 政敏 三次 岳志

大洗工学センター 照射施設運転管理センター

Performance Evaluation of "JOYO" Material Testing Rig with Temperature Control

Hajime KATAOKA

Masatoshi SOROI

Takeshi MITSUGI

Irradiation Center, O-arai Engineering Center

高速実験炉「常陽」におけるオンライン計装照射装置の一つとして、高速炉燃料被覆管材の照射下内圧クリープ破断試験を行うことができる温度制御型の照射装置 MARICO を開発した。MARICO では、米国 FFTF 炉の照射装置 MOTA と同様な制御原理により、照射試料の温度を  $\pm 4$  の制御幅で高精度に維持することができる。

照射試験は、「常陽」の第29サイクル(1994年)から第32サイクル(1998年)まで行われ、約5,030時間の照射実績が得られた。また、照射後試験により48試料ある内圧クリープ破断試験用の試料のうち、23試料について破断が確認された。

本報告では、MARICO 1号機の開発成果と使用結果をまとめ、2号機での取組も含めて報告する。

*In the experimental fast reactor JOYO, an on-line instrumented material irradiation rig has been developed to acquire various irradiation data. The Material Testing Rig with Temperature Control (MARICO) is capable of collecting creep rupture strength data for fast reactor fuel cladding materials. The specimen temperature in the MARICO-1rig is controlled with an accuracy of  $\pm 4$  by the use of a gas gap method similar to that of FFTF/MOTA.*

*The MARICO-1rig was irradiated for 5,030 hours. The irradiation began in 1994 with JOYO's 29<sup>th</sup> operational cycle and ended in 1998 with the 32<sup>nd</sup> cycle. Forty-eight specimens were irradiated and the P. I. E. showed 23 had ruptured.*

*This report describes the development of the MARICO-1rig and the tests conducted with it. The plans for the next generation rig, MARICO-2, are also discussed.*

## キーワード

高速実験炉，「常陽」，温度制御型材料照射装置，オンライン計装，計装照射装置，燃料被覆管，照射試験，材料試験

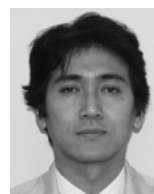
*Experimental Fast Reactor, JOYO, Material Testing Rig with Temperature Control, Real Time On-line Monitoring, Instrumented Irradiation Rig, Cladding Materials, Irradiation Testing, Material Testing*



片岡 一  
照射管理課計装照射チーム所属  
副主任研究員  
計装照射装置の開発，照射試験の業務に従事



揃 政敏  
照射管理課計装照射チーム所属  
副主任研究員  
計装照射装置の開発，照射試験の業務に従事



三次 岳志  
照射管理課長  
照射管理課業務の総括  
核燃料取扱主任者

## 1. はじめに

高速実験炉「常陽」では、1982年の照射用炉心（MK II 炉心）移行後に本格的な照射試験が開始され、高速炉の燃料・材料を中心とした様々な研究開発に活用されてきた。

「常陽」での照射装置には、炉心燃料集合体とほぼ同一の形状をした全長3m弱のオフライン照射装置と、熱電対等の計測線が装備され、炉心上部機構を貫通して炉心まで挿入される長尺のオンライン照射装置とがある。しかし、前者は低コストで炉心の任意の場所に装荷可能で取り扱いが簡便である反面、目標とする照射条件を達成する観点からは必ずしも満足のいくものではない。オンライン照射装置の一つに、ここで報告する温度制御型材料照射装置（MARICO：Material Testing Rig with Temperature Control）があり、これは、照射

中の試料を一定温度に制御することができる全長11m近い照射装置である。

照射試料の温度データ等をオンラインで計測することは、精度良く照射条件の変化も観測できるため、照射試験として望ましい形態であるが、その装置開発に当たっては、照射孔が限定され寸法制約があることや、回転プラグを介することから照射装置自体の構造が細径で複雑になることなど、計測線の処理も含めて多くの解決すべき技術的課題があった。「常陽」では、1989年の概念設計をもって MARICO 1号機の開発に着手し、1994年から1998年の原子炉運転で実際に照射、1998年に原子炉から脱荷することにより照射試験を終了した。なお、現在もさらに高性能化を指向した2号機の開発を進めている。

本報では、MARICO 1号機の開発成果と使用結

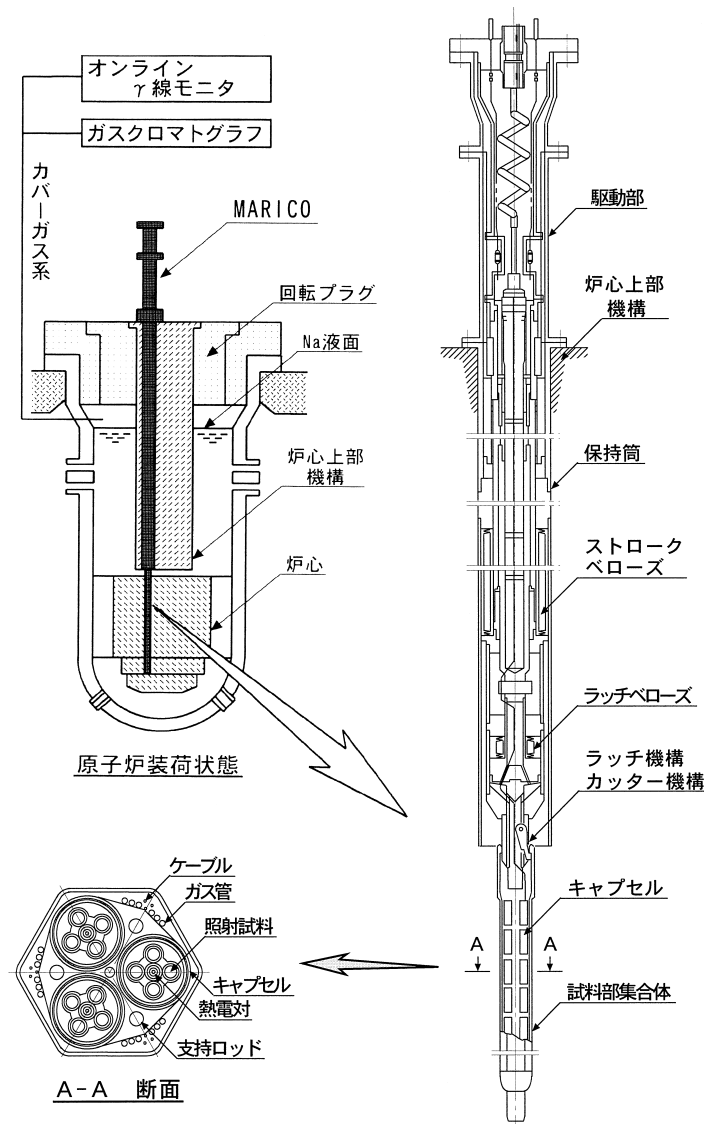


図1 温度制御型材料照射装置（MARICO）

果及び2号機での取組等について、既報<sup>1)~6)</sup>の内容を含めつつ全容を報告する。

## 2. 温度制御型材料照射装置及び照射試験の概要

MARICOは、燃料寿命を制限する重要な因子の一つである、被覆管材料の中性子照射下での内圧クリーブ破断強度を試験することを主な目的とした照射装置である。材料の中性子照射下でのクリーブ破断強度は照射温度に敏感なため、その試験は温度を精度良く制御しつつ行うことが重要である。また、照射試料のクリーブ破断を検出し、破断時間を決定することも必要となる。これらの要求に応えるため、照射中の温度を精度良く制御し、照射試料のクリーブ破断時間を検出できる技術を開発してMARICOを製作し、それによって照射試験が行われた。

MARICOと温度制御の原理を同じくする装置としては、米国FFTF(Fast Flux Test Facility)の照射装置MOTA(Materials Open Test Assembly)が知られている。MARICOの概念を構築する上ではMOTAを参照しつつも、プラントの相異に伴う制約等については、概略以下のような対応をとることとした。

照射専用炉として建設されたFFTFは、炉心の高さや試料部集合体の径寸法が大きく、さらに、MOTAは照射試験部である試料部集合体とその保持部分が一体構造であるため、冷却材流路が単純となってサーマルストライピングによる熱的制約が比較的小さい。これに対し、MARICOは「常陽」の既存設備と調和することを前提に計画され、小型試料部集合体へのキャプセル組込み、サーマルストライピングの制約に起因した冷却材温度やキャプセル設計温度の制約への対応など、幾つかの課題を設計で解決した。また、破断により放出される試料特有のガスから破断試料をオンラインで同定できるタグガス検出システムを持つMOTAに対し、MARICOでは破断により放出されるガスをボイド計で検知して破断試料を同定することとした。MARICOの基本構造を以下に述べる。

MARICOは、炉心第3列の照射孔に据付けられ、炉心に位置する試料部集合体には、照射試料を装填したキャプセルが径方向3基、軸方向5段の計15基組み込まれている。このうち、炉心中央部にクリーブ破断強度試験を行う温度制御型キャプセル(6基)が配置されており、照射中の温度を炉の外部から制御できるようになっている。照射試料にクリーブ応力を負荷するためには、MOTAと同様に、密封構造の照射試料に少量のタグガス

(Xe+Kr)を混ぜたヘリウムを封入している。

MARICOの構造を図1に、温度制御型キャプセルの構造を図2に示す。また、試料部集合体の内部外観を写真1に、照射試験の概要を表1に示す。

MARICOの計装には、オンライン計装として、K(CA)型熱電対が計10本(温度制御型キャプセル用6本、温度計測型キャプセル用3本、集合体出口ナトリウム温度測定用1本)と、照射試料のクリーブ破断を検出するための温度補償型ボイド計<sup>8)</sup>が、温度制御型キャプセルにそれぞれ1本ずつ計6本装備されている。オフライン計装としては、無計装型キャプセル(6基)に熱膨張差温度計(TED)が、また、集合体各部7箇所ドシメータが装填されており、照射後試験で温度や照射量が評価できるようになっている。

MARICOの特徴となっている照射キャプセルの温度制御や照射試料のクリーブ破断検出は、次のようにして行われる。

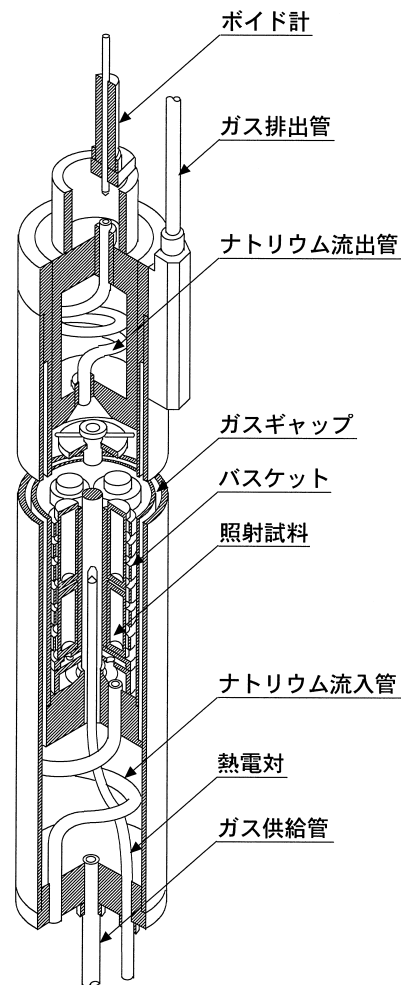


図2 温度制御型キャプセル



写真1 MARICO 試料部集合体

表1 MARICO による照射試験の概要

項目	MARICO 1	MARICO 2	
照射位置	炉心第3列(3E3)		
試料装荷	再装荷機能なし	再装荷型	
照射キャプセル	15個(径方向3個×軸方向5段) ・温度制御型 6個 ・温度計測型 3個 ・無計装型 6個		
照射試料	高速炉用炉心材料 ・クリーブ破断試料(48個) ・クリーブ歪試料(23個) ・スエリング歪試料(9個) ・シャルピー試験試料(11個) 大学受託照射試料(2個)	高速炉用炉心材料 ・クリーブ破断試料 ・クリーブ歪試料 ・スエリング歪試料 ・シャルピー試験試料 大学受託照射試料 *試料数量は調整中	
	口径	外径5.0mm	外径5.0mm及び太径試料
高速中性子束 (E 0.1MeV)	~2.4×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> ·s	~3.3×10 <sup>15</sup> n/cm <sup>2</sup> ·s	
照射温度範囲	450 ~ 670	405 ~ 750	
キャプセル 温度制御	制御方法	ギャップの熱抵抗制御	ギャップの熱抵抗制御 電気ヒータ(1個)
	制御幅	±4 (目標)	
オンライン 計測	K熱電対	10本	11本
	ボイド計	6本	4本
オフライン計測	熱膨張差温度計(TED) ドシメータ		

## (1) 温度制御

照射キャプセルの温度制御は、照射キャプセルに設けた二重壁の空間のガスを、適時原子炉容器の外部から混合比(Ar:He)を変えたガスに置換して、熱伝導率を調節することにより行う。すなわち、キャプセル各部に生じる発熱の放熱量を変えることによって、キャプセル内部を一定温度に制御するものである。また、過渡時を含め応答性を良くして温度制御精度を向上させるために、温度制御型のキャプセルごとに混合ガスの供給系を設けている。なお、必要とする濃度の混合ガスは、アルゴンとヘリウムを濃度に応じた分圧比で

混合することにより作成し、さらに、置換効率を高め排出ガス量も抑えるよう、加圧・脱気を繰り返すことによってキャプセルのガス置換を行う。また、「常陽」のような小型炉心では、軸方向の発熱勾配が急峻なため照射試料に温度差が生じやすいことから、この温度差を極力均一にするため、キャプセル断熱ガス層内に段差をつけてギャップ寸法を調節する工夫をしている。

## (2) 制御パターン

照射キャプセルの温度を高精度で制御しようとする時、単なるON/OFF制御やPID制御では原子炉の出力変動等に伴う温度変化に追従できないため、原子炉の運転パターンに対応した制御ロジックが組まれている。

計算機を用いた制御指令系では、原子炉出力安定時(定常時)の他に、比較的大きな外乱となる1日3回8時間ごとに行われる原子炉出力の調整時(炉出力調整時)と、1運転サイクル中に行われるプラントの特性試験のうち、数時間にわたって炉出力が定格より低くなるプラント安定性試験時(安定性試験時)の計3事象に対応するロジックを有している。これにより、定常時: -6 / 8h程度の変化、炉出力調整時: +6 / 2min程度の変化、安定性試験時: ±15 / 15min程度の変化に追従できるようになっている。

## (3) 照射試料のクリーブ破断検出

照射試料のクリーブ破断を検出するため、1基当たり8個の試料を収納する照射キャプセル各々には、気泡を検出するボイド計が取り付けられている。1つのキャプセルには、破断時間の異なる同一鋼種の試料のみをグループ化して収納しているため、試料破断時に放出されるガスによってボイド計が応答し、これにより破断時期と破断試料の鋼種が分かる。この時、キャプセルの中では破断時間が短期の試料から破断することを仮定して、破断試

料を同定することができる。

なお、照射試料の破断時期を明らかにする手段として、ボイド計の他にも図1に示す原子炉容器カバーガス系に接続されたオンライン線モニタやガスクロマトグラフでの検出、さらには、照射キャプセル温度制御用熱電対の指示値変化による検出が補助的機能として期待された。ここで、オンライン線モニタは、原子炉一次系カバーガス中の線をモニタしている装置であるが、この線検出機能を利用して破断試料から放出されるタグガス成分を検出しようとするものである。また、ガスクロマトグラフは、原子炉一次系カバーガス中の不純物濃度を計測している装置であり、破断試料から放出されるヘリウムを検出しようとするものである。

MARICOにおける照射試料のクリーブ破断検出についても、当初、MOTAでクリーブ破断検出に採用しているオンラインタグガス検出システムを用いることが最良と考えられたが、「常陽」ではそのような設備がなく、設置スペースの問題を含め

て解決すべき課題が多いため、1号機からの適用は断念した経緯がある。しかし、照射試料には重照射(途中に照射後試験をはさみながらMARICO後続機で継続照射)に備え、その時期には「常陽」でもオンラインタグガス検出システムが開発されていることを期待して、タグガスが封入されている。

### 3. 照射試験結果

#### 3.1 照射実績

照射試験は、MK II炉心の第29サイクルから第32サイクルの間の約210EFPD(Effective Full Power Days: 約5,030時間)にわたって行った。この間、第29サイクルにおいて外部電源喪失(1994年9月1日)によるスクラムと主送風機トリップによる制御棒一斉挿入(1994年9月20日)をそれぞれ1回、第31サイクルにおいて外部電源喪失(1997年8月26日)によるスクラム1回の計3回の計画外停止を経験した。MARICO照射期間中における原子炉運転履歴を図3に示す。

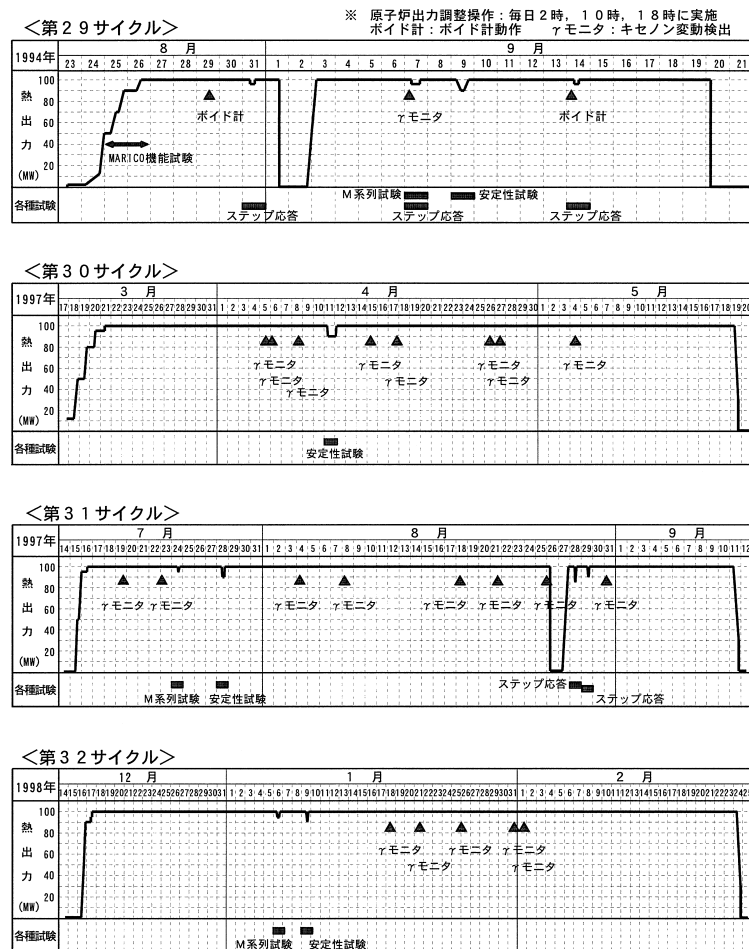


図3 MARICO照射期間中の原子炉運転履歴

(1) 中性子照射量

MARICOにおける中性子照射量は、「常陽」運転監視コード MAGI の計算結果から図4に示すとおり、照射量が最大となる3段目キャプセルにおいて約 $4 \times 10^{22} \text{ n/cm}^2$  (E 0.1MeV)であった。

(2) 照射温度

各照射サイクルにおけるキャプセルの照射温度を、サイクルの初期と末期に分けて表2に示す。

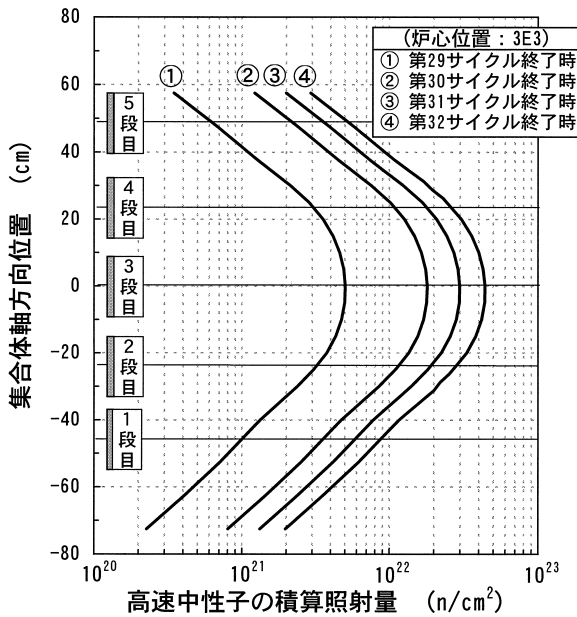


図4 キャプセルの照射量 (E 0.1MeV)

MARICOの2段目から4段目に配置された計9キャプセルの温度は、それぞれが熱電対を有していることからその値を記している。3段目、4段目のキャプセルは温度制御型であるので、当然のことながら照射温度は目標温度となっている。1段目と5段目のキャプセル温度については、TEDが記憶した照射期間中のピーク温度に基づき、サイクルごとの中性子束分布の比を考慮することによって評価したものである。それぞれのピークの発生時期については、1段目のキャプセルについて第31サイクル初期、5段目のキャプセルについて第30サイクル末期であった。

これらの結果から、試験計画時に設定した目標温度に対して、1段目キャプセルは40~50 高め、2段目は10~30 低め、そして5段目は50~100 高めで照射されたことが分かる。

また、MARICOで計測した温度を基に、それぞれの位置でのステンレス鋼(SUS316)の線発熱密度を算出すると、図5に示すとおりとなった。ここで、DORTで表す線発熱密度のカーブは、二次元輸送計算コードDORTによるMK II炉心第3列についての遅発線を考慮した解析値である。C/Eは、この解析値とMARICOでの評価値との比を示す。

3.2 照射試料のクリープ破断時期

照射試験の期間中に生じた試料のクリープ破断

表2 キャプセルの照射温度

単位 ( )

キャプセル No.	運転サイクル	29cy		30cy		31cy		32cy	
		初期	末期	初期	末期	初期	末期	初期	末期
1 段目	1 - A (450)	497	496	498	496	499	497	497	495
	1 - B (450)	490	489	490	488	491	489	489	487
	1 - C (450)	494	493	495	493	496	494	494	492
2 段目	2 - A (605)	587	585	590	584	591	587	586	582
	2 - B (550)	519	520	521	519	522	520	518	515
	2 - C (495)	486	[ 485 ]	[ 488 ]	[ 486 ]	[ 489 ]	[ 487 ]	[ 486 ]	[ 484 ]
3 段目	3 - A (670)	670	670	670	670	670	670	670	670
	3 - B (670)	-	-	-	-	-	-	-	-
	3 - C (670)	670	670	670	670	670	670	670	670
4 段目	4 - A (605)	605	605	605	605	605	605	605	605
	4 - B (605)	605	605	605	605	605	605	605	605
	4 - C (605)	605	605	605	605	605	605	605	605
5 段目	5 - A (550)	645	654	643	663	643	658	629	641
	5 - B (550)	637	645	635	654	634	650	621	633
	5 - C (550)	599	607	598	614	597	610	585	596

注) ・キャプセル No.に併記した括弧数字は、目標照射温度

- ・1段目、5段目のキャプセル温度は、TEDでの評価温度に基づく計算値
- ・3-Bキャプセルの熱電対は、断線により指示不良
- ・2-Cキャプセルの熱電対は途中から指示不良、カギ括弧数値は中性子束分布に基づいて比例計算した推測値

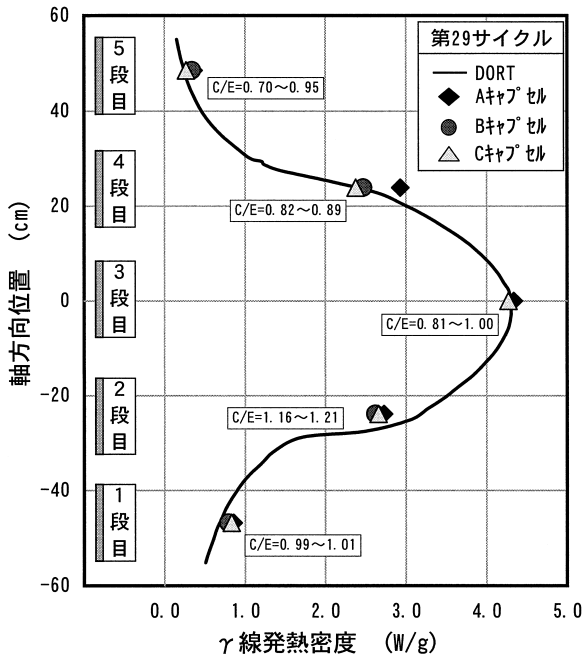


図5 MARICOにおける線発熱密度評価値とDORTの値

時の検出結果は、各々以下のとおりであった。

ボイド計では2回の有意な変化が計測された。試験初期の第29サイクルにおいて、いずれも4 A キャプセルのボイド計が動作した。

オンライン線モニタでは、照射試料に封入したタグガス成分のうち、キセノンを検出することができた。オンライン線モニタによる計測は、30分間隔(配管フラッシング12分、ガスサンプリング6分、計測12分)で行われることから、破断の検知精度が30分単位になるという制約はあるものの、照射試験の期間中にキセノンの変動が24回計測された。計測例を図6に示す。

ガスクロマトグラフでは、キセノンと混合して封入したヘリウムの放出を検出することが期待さ

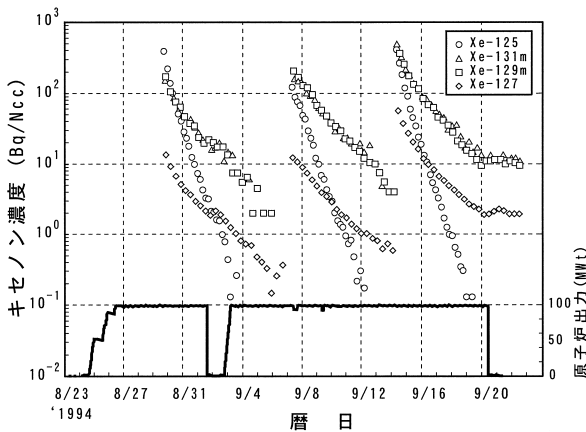
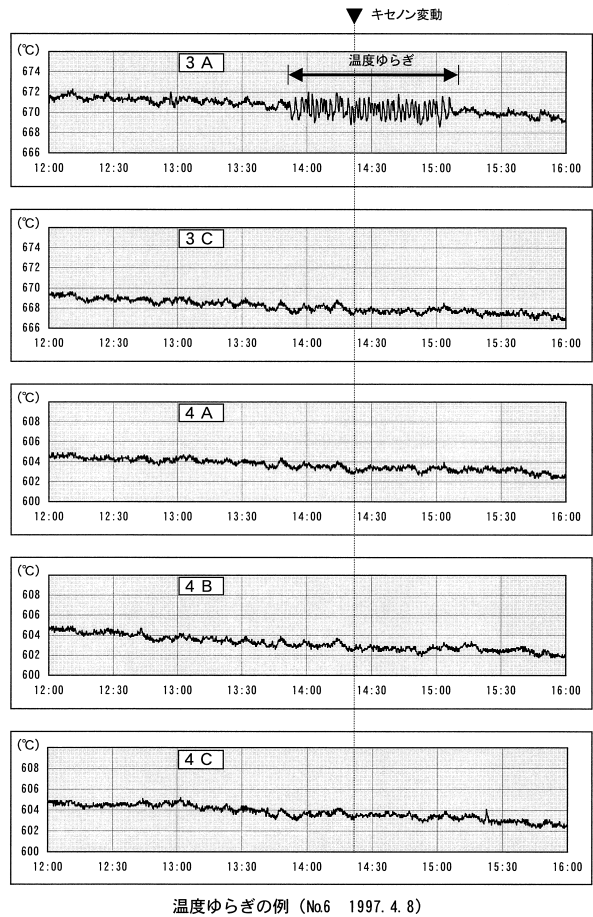


図6 オンラインモニタによる破断検出例

れたが、第29サイクルにおける2回のボイド計動作時の変動を明確に確認できた程度であった。

また、照射試験の期間中、温度制御型キャプセルの温度変化を記録していたが、特定の時期に温度揺らぎが認められた。温度揺らぎは、いずれもオンライン線モニタがキセノンの変動を検出した時刻の前後で発生しており、それ以外の時期にはここでの温度揺らぎに相当する波形は一切認められなかった。ただし、オンライン線モニタでの検出回数24回に対応して、すべての回に温度揺らぎが認められたわけではなく、揺らぎが認められたのは計19回であった。温度揺らぎの代表例として、3 A キャプセルで計測した波形を図7に示す。



温度ゆらぎの例 (No.6 1997.4.8)

図7 キャプセル温度制御用熱電対で計測した温度変動

一方、照射後試験(PIE)の結果から、クリーブ破断試料は23試料であることが明らかになった。このうち、開口形態での破断試料は2試料で、6試料がヘアクラック状、残り15試料については目視では破断箇所が確認されなかった。この15試料については、照射試料の重量計測により封入した

ガスの重量分だけ軽量化したことから破断したと判断されたものである。ただし、15試料のうち1試料だけは照射前重量よりも重くなっており、これについては内部にナトリウムが浸入したものと判断された。

試験目的に照らし非常に重要である照射試料の破断時期についてであるが、検出回数が2回にとどまったボイド計の情報だけでは、毎回のキャプセルで破断を生じたかを知ることができなかつたため、取得情報を総合して破断時期を推測することとした。

破断試料23試料に対し、オンライン線モニタでの検出回数が24回で数値的にほぼ一致することから、破断時期はオンライン線モニタでの検出時である可能性が高く、この時、温度揺らぎが発生したキャプセル内で試料が破断したものと考えると、いくつかの照射試料についてはその破断時期を絞り込むことができる。また、破断試料数と検出回数の不一致の原因は、同一試料からのガス放出が断続的であり、試料中のガスが二度あるいは三度に分けて放出され、これをオンライン線モニタが別々に検出した可能性が考えられる。事実、オンライン線モニタでの検出日時と温度変動キャプセルの関係、キャプセルごとの照射時間の関係を示した表3を見ると、8試料しか収納しなかった3Aキャプセルで9件の温度揺らぎが発生していることから、このキャプセルにおいてダブルカウントしたと考えられる。

## 4. 性能評価

### 4.1 温度特性と温度制御性

照射キャプセルの温度制御は、目標温度 $\pm 4$ に対して、炉出力調整(98MWtから100MWt)時及び定常時ともに、図8に示すようにおおむね良

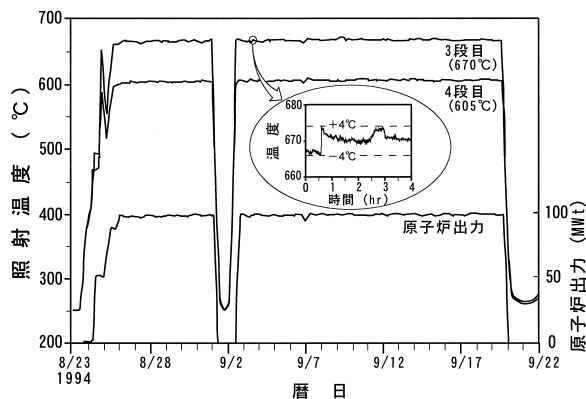


図8 キャプセル温度制御の例(第29サイクル)

好な温度制御性を示した。

しかし、照射試験開始直後に実施したプラントの安定性試験時においては、制御定数が調整中であつたこと、実際の温度変化が設計より速かつたことにより、目標温度 $\pm 4$ からの瞬間的な逸脱(+側へ4, -側へ9)が認められた。この逸脱の原因は、制御動作の中で最も重要なプロセスである混合ガスの作成と置換に一定の時間(約5分)を必要とするため、温度変化が速すぎると制御に遅れを生じるためであり、外乱に対する応答性の面での余裕はそれほど残されていないことが確認された。

照射試験のため特定の温度に保つこととは別に、温度制御型キャプセルとしての能力を調べる観点から、設定できるキャプセル温度の範囲を原子炉定格出力時に調べた。結果は次のとおりであつた。炉心中央部の3段階目キャプセルについて、高温側はキャプセルの設計の上限値である700まで設定可能であつたが、低温側については、つまり、最低の温度となる100%濃度のヘリウムに置換した時の温度は約580であつた。これにより、混合ガスの濃度調節で設定が可能となるキャプセル温度の範囲は、約120の幅を持つことが確認された。

ところで、原子炉の起動、停止におけるプラント過渡時においてもキャプセルの温度を目標温度に保ちたいとする要求があるが、これは現状のMARICOの制御系にとって極めて大きな外乱となることから自動制御で対応することができない。しかし、この場合でも炉出力50MWtの状態から定格100MWtまでの間、混合ガスのアルゴン比が徐々に低くなるよう試験員が手動で制御系を調節することにより、キャプセルを目標温度(670/605)まで昇温して、その近傍温度に保持することができた。

### 4.2 照射試料の破断検出性能

破断検出器に採用したボイド計は、ナトリウム沸騰実験等でのボイド計測を目的に、サイクル機構で開発した温度補償型のものである。原理は、2本の芯線とシースを接続した検出器先端部に定電流を供給しておき、ボイドが通過する際に生じる熱バランスの変化によるシース材抵抗値の微小変化を、電圧の変化として取り出すものである。

ボイド計では第29サイクル照射でのみ、2件のクリーブ破断を検出した。それ以外の破断時は、ボイド計では検出できなかったことから、照射試料からのガスの放出がボイド計の検出下限値である0.05cc/sを下回る緩やかな放出であつたものと



表3 オンライン 線モニタでの破断検出日時

検出	日付	時刻	運転 サイクル	積算時間 (h)						ボイド計	温度計 揺らぎ
				3 - A	3 - B	3 - C	4 - A	4 - B	4 - C		
1	08/29/94	14:24	29	97	97	97	97	97	97	動作	4 A
2	09/07/94	4:11		271	271	271	271	271	271		4 B
3	09/14/94	6:52		443	443	443	443	443	443	動作	4 A
4	04/05/97	11:22	30	1,004	1,007	1,004	1,007	1,005	1,004		3 A
5	04/06/97	0:22		1,017	1,020	1,017	1,020	1,018	1,017		
6	04/08/97	14:22		1,080	1,082	1,080	1,082	1,081	1,080		3 A
7	04/15/97	6:52		1,240	1,242	1,240	1,242	1,241	1,240		4 A
8	04/17/97	20:52		1,302	1,305	1,302	1,305	1,303	1,302		3 A
9	04/26/97	10:52		1,507	1,510	1,507	1,510	1,508	1,507		3 A
10	04/27/97	9:22		1,529	1,532	1,529	1,532	1,531	1,529		
11	05/04/97	11:52		1,706	1,709	1,706	1,709	1,707	1,706		4 B
12	07/19/97	20:17		2,159	2,162	2,159	2,162	2,161	2,159		3 A
13	07/23/97	3:47		2,238	2,252	2,238	2,252	2,240	2,239		4 A
14	08/04/97	6:47		2,531	2,534	2,531	2,534	2,532	2,531		3 A
15	08/08/97	6:47	2,625	2,628	2,625	2,628	2,626	2,625			
16	08/18/97	10:14	2,869	2,872	2,869	2,872	2,870	2,869		4 B	
17	08/21/97	19:14	2,950	2,953	2,950	2,953	2,951	2,950		3 C	
18	08/25/97	23:14	3,050	3,053	3,050	3,053	3,051	3,050		3 A	
19	08/31/97	3:44	3,159	3,163	3,159	3,163	3,159	3,160			
20	01/18/98	11:36	32	4,196	4,201	4,195	4,201	4,196	4,197		4 A
21	01/21/98	15:06		4,272	4,276	4,271	4,276	4,272	4,273		3 A
22	01/26/98	0:06		4,377	4,381	4,376	4,381	4,377	4,378		3 A
23	01/31/98	21:36		4,518	4,523	4,517	4,523	4,518	4,519		
24	02/01/98	18:36		4,537	4,542	4,536	4,542	4,537	4,538		4 A

推測している。炉内における試料破断のほとんどのケースが MARICO 1 号機と同様に緩やかなガス放出となるとすれば、MARICO 2 号機以降の照射試験においてもボイド計での破断検出は困難であることを示しており、その他の検出系での破断検出がより重要なものになってくる。MOTA では、オンラインタグガス検出システムによって確実に破断試料を同定できていることから、「常陽」においてもプラントに適合するように工夫したオンラインタグガス検出システムの開発、実用化が強く望まれる。

一方、今回の照射試験を通じて、原子炉容器カバーガス系のオンライン 線モニタは、照射試料のクリープ破断検出に有効であることが、また、照射キャプセル温度制御用熱電対での温度ゆらぎによっては、試料破断を検出できる可能性があることが分かった。しかし、ガスクロマトグラフによって放出ヘリウムを検出する方法については、その濃度変化が必ずしも顕著でないことから検出性能に劣ることが確認された。

#### 4.3 熱電対の健全性

キャプセル温度の測定には、1 号機では670 までの照射温度を測定するために、シース外径1.6mm の細径の K 型熱電対10本が用いられている。これらの熱電対については、1 号機での照射温度と同じ605 及び670 と、2 号機で追加される照射温度750 の3点について、目標使用期間6,700時間を超える約7,000時間の炉外耐久試験 (Ar ガス中で酸素濃度は、60~115ppm) を行い、熱起電力の特性変化等を測定した。同耐久試験に供した605 / 670 用の熱電対については、1 号機と同一製造ロットのものから採取し、750 用については1 号機用と異なる製造ロットから採取した。試験の結果、605 / 670 用では、6,700時間で約1.5 の熱起電力の低下が見られ、750 用では同じく約4 の低下が見られた。これらの熱起電力の低下は、いずれの熱電対においても約2,000時間付近から始まることが確認された。これら熱起電力の低下の原因は熱電対素線の酸化であり、605 / 670 用と750 用の差は、試験温度が主な原因で生じたものと考えられる。

また、他の熱電対の計測精度への影響として中

中性子照射による影響が考えられ、熱中性子照射量  $1 \times 10^{21} \text{ n/cm}^2$  程度までの熱起電力の変化は 1% 以内<sup>9)10)</sup>とされている。MARICO が受けた熱中性子照射量は約  $1.7 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$  であることから、MARICO における熱起電力の変化は 1% 以内にあるものと評価している。

#### 4.4 照射試料の温度平坦化

キャプセル温度は、発熱分布が急峻なことから生ずる照射試料の軸方向温度分布をできるかぎり抑制して平坦化するように設定する。具体的には、図 2 に示すガスギャップ部の寸法を 発熱の分布に応じて軸方向で変えて放熱量を調節すること、キャプセル上下に断熱用のガス層を設けることによって対応している。図 9 に、熱解析により求めた温度平坦化対策前後の照射試料の温度分布を示す。図 9 に示すように、温度平坦化対策を施すことによって、キャプセル上下間の温度差が小さくなり、上側の照射試料で約 20 から 11 へ、下側の試料で約 9 から 4 へと各々の温度差が減少していることが分かる。この時のキャプセル内のギャップ寸法は 0.24mm ~ 0.34mm で、加工・組立精度上ほぼ限界であることから、この方法による照射試料の軸方向温度差の減少は限界であると評価している。なお、図 9 で両端の温度が高く

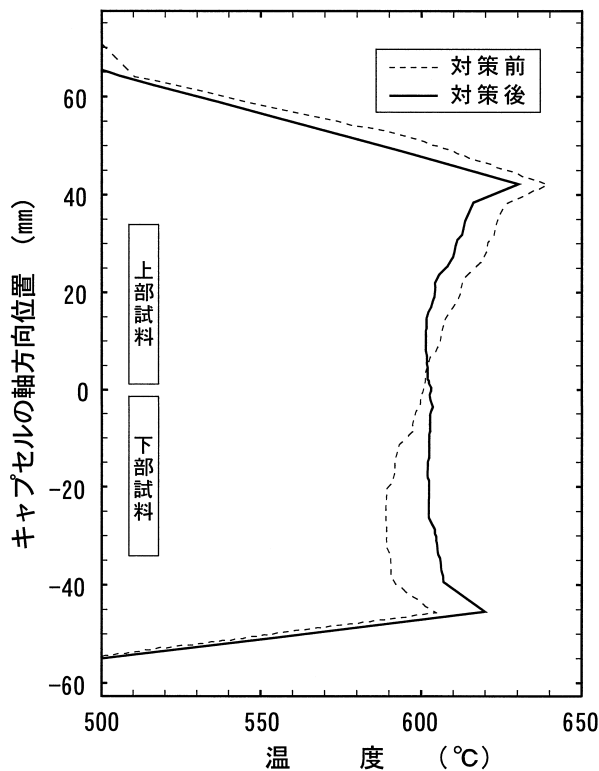


図 9 照射試料温度平坦化の例

なっているが、これはキャプセルの上下に断熱用のガス層を設けたことによるものである。

#### 4.5 計測線の切断能力

「常陽」では MOTA のように専用の解体設備がないため、照射終了時に MARICO 試料部集合体から引き出されている計測線をカッター機構により切断して、試料部集合体を通常の燃料交換系を用いてホットセルに搬送しなければならない。原子炉の燃料交換時に回転プラグを回すことが必要な「常陽」にあっては、この試料部集合体を切り離す機能は極めて重要であるため、確実に計測線の切断ができることを要求される。

計測線の切断の実績は、これまで類似照射装置である計測線付燃料集合体 (INTA : Instrumented Test Assembly) で 3 回 (INTA 1, 2 & INTA S) あり、その時の計測線は最大 20 本 (太径 : 7 本 (外径 3.2mm), 細径 : 13 本 (外径 1.3 & 1.6mm)) であった。これに対して、MARICO では計測線が 28 本 (太径 : 12 本 (外径 3.2mm), 細径 : 16 本 (外径 1.6mm)) と大幅に増加している。このため、カッター機構には、貫通孔を可能な限り密着配置して数を増やしたり、細径の計測線 2 本を同一貫通孔に配置する等の工夫を施した。

その結果、第 32 サイクル照射後に MARICO を原子炉から取出すための脱荷作業実績によれば、制限荷重 1 t に対し実荷重 0.7 t でこれらの計測線を切断することができ、十分な切断能力を有することが確認された。PIE 時における当該部の X 線透視映像を写真 2 に示す。

#### 5. 2号機での新たな取組

MARICO 2 号機では、更に以下のような改良を加えて照射試験に臨む計画であり、現在その開発を進めている。

2 号機での照射試験の概要を表 1 に示す。

##### (1) 再装荷機能の付加

重照射データを取得すべく 1 号機で照射した放射化試料を 2 号機、3 号機と乗り継いで照射するため、試料部集合体及び照射キャプセルをホットセル内において、遠隔操作により組立てられるような構造に改良する。

##### (2) 照射試料の太径化対応

1 号機では、細径 (外径 5 mm) の燃料被覆管材料を照射しているが、より太径材料の照射要求に応えるため、照射キャプセル内部の構造の改良を行う。

### (3) 照射温度領域の拡張

1号機での照射キャプセルについて、低温側の設定温度は495℃、高温側は670℃となっている。材料開発上のデータベースを拡充するため、2号機では温度領域を405℃から750℃に、さらに拡張する。

### (4) 温度制御の高度化

「常陽」の利用形態の一つとして材料の照射損傷等に係る基礎研究を目的に、国内の大学研究者からの受託照射がある。近年、原子炉を用いた照射研究の結果から、従来行われてきた原子炉の起動、停止時に受ける低温照射がその後の照射損傷に重大な影響を与えることが加速器を用いた照射試験結果との比較等において明らかとなり、国内研究者を中心に「常陽」におけるこれらの影響を回避

した一定温度照射や、温度幅を制御した変動照射の実現に向けて、強い要望が出されている。例えば、照射キャプセルの温度制御では、原子炉の起動前に電気ヒータで照射目標温度に昇温し、原子炉停止時まで温度を一定に制御しておき、原子炉停止後に電気ヒータを切って降温する、というような照射モードが期待されている。<sup>11)</sup>

このため、環境効果による耐久性等に若干の課題を残しつつもマイクロヒータを組み込んだ照射キャプセルを設計、製作し、照射試験に試用する。図10にヒータ付きキャプセルの構造を示す。

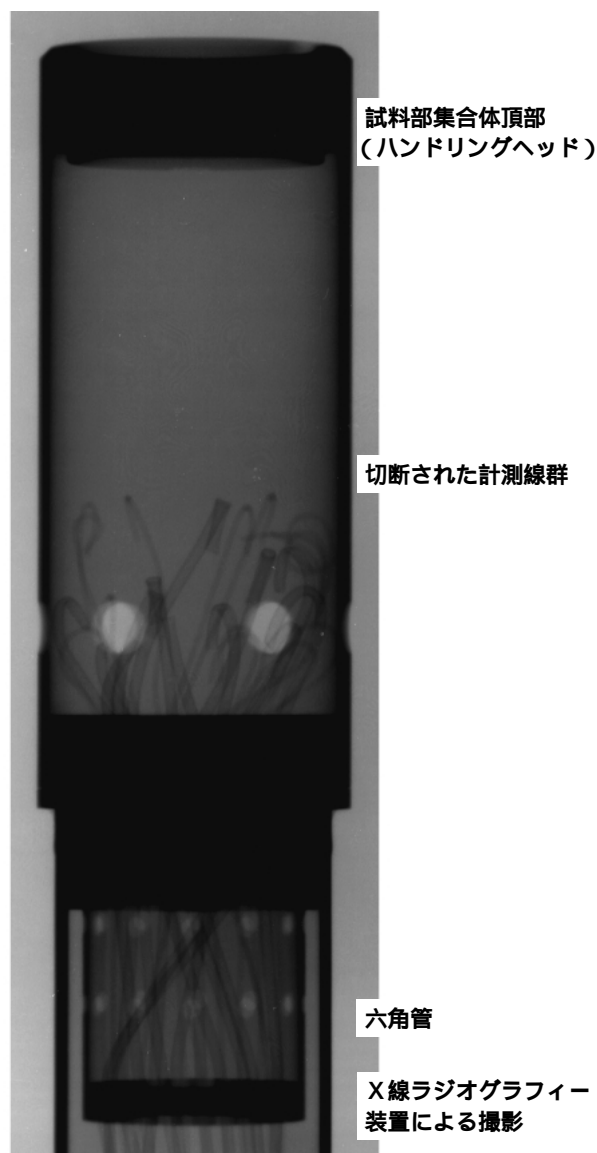


写真2 カッター機構で切断した後の計測線

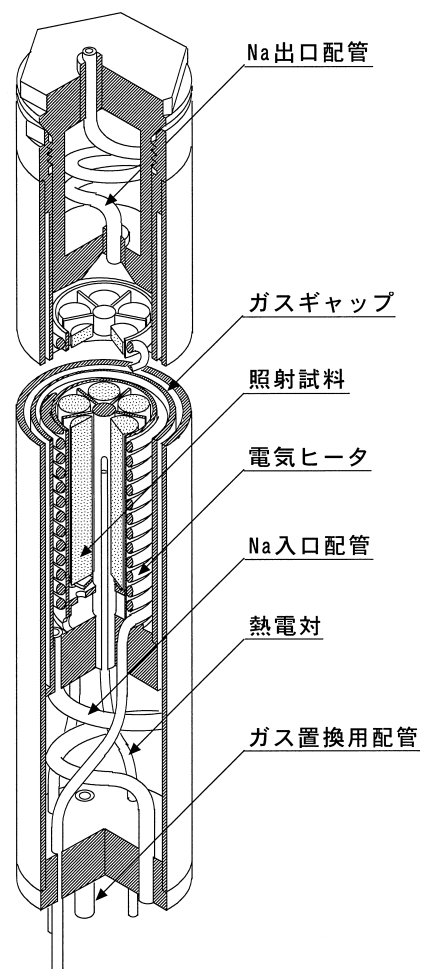


図10 ヒータ付きキャプセル

## 6. おわりに

「常陽」では、MARICOを代表としたオンライン計装照射リグを開発、実用化し、照射技術の高度化に努力してきた。現在、「常陽」は照射性能をさらに高めるMKⅢ炉心に改造中であり、多種多様な照射依頼に対応するために照射技術のなお一層の高度化が求められている。

今後の「常陽」における照射試験では、高性能

燃料開発や、FBR プラントの高度化等のプルトニウム利用計画に必要な照射データを取得すること、国内の基礎研究分野や国際協力等の多方面のニーズに応えることが求められる。また、研究開発の進展によってより精度が高く、燃料や材料の性能限界に近い照射試験の実施が要求され、実現困難性の高いものになると考えられる。これらの要請に応えるべく、今後は照射精度の向上、限界照射能力の向上、試験コストの合理化等の観点から、さらに照射リグの改良に取り組んでいく計画である。

#### 参考文献

- 1) 揃政敏, 野口好一他: 原子力学会「1994秋の大会」予稿集, P. 2
- 2) 片岡一, 揃政敏他: 原子力学会「1995秋の大会」予稿集, F. 19
- 3) 揃政敏, 片岡一他: 平成7年度弥生研究会発表要旨集, 東京大学工学部附属原子力工学研究施設, UTNL R0333, P. 2, (1996)
- 4) 安哲徳, 揃政敏他: オンライン照射技術, 動燃技報, No. 104, P. 77 (1997)
- 5) 揃政敏, 片岡一他: 高速実験炉「常陽」におけるオンライン計装照射技術, 日本原子力学会誌, Vol. 40, No. 2, P. 124 (1998)
- 6) H. Kataoka, T. Yasu, et al.: "Development of material irradiation rig with precision temperature control in experimental fast reactor JOYO", Journal of Nuclear Materials, Vol. 258 263, P. 677 681, (1998)
- 7) R. B. Baker, S. A. Chastain 他: 米国 FFTF における燃料・材料照射技術の現状と将来, 原子力学会誌, Vol. 31, No. 7, P. 773, (1989)
- 8) 特許: "温度補償型ボイド計", 第1547229号.
- 9) 若山直昭: 機械学会誌, 第82巻, 第731号, P. 78 (1979).
- 10) 荒克之, 川口千代二: "原子炉の計測", 幸書房, P. 263 (1978)
- 11) 例えば, 松井秀樹: 大学からの課題による照射実験, Energy Review, 1999 10, P. 16 (1999)