

JAERI-M

88-128

JPDRとJMTRの使用済燃料集合体の
崩壊熱測定

1988年7月

村上 清信・小林 岩夫

JAERI-M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。

入手の間合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokaimura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 日青工業株式会社

JPDR と JMTR の使用済燃料集合体の崩壊熱測定

日本原子力研究所東海研究所 NUCEF 建設室

村上 清信・小林 岩夫⁺

(1988年6月14日受理)

原子炉から取り出された使用済燃料集合体は、燃料内に蓄積された核分裂生成物の崩壊に伴うエネルギー放出により、長期に渡って発熱し続ける。この崩壊熱を測定することは、燃料集合体の燃焼度を決定したり、燃料輸送時に使用する輸送容器の設計、使用済燃料の貯蔵施設の設計等に重要な情報を与える。しかし、この測定は、核分裂生成物から発生する強力な放射線とともに、測定対象が大きいこともあって困難なものとされている。本報告書は、使用済燃料の発熱量を測定するために製作した熱量測定装置、および同装置を用いた使用済燃料集合体の発熱量測定実験について報告するものである。

この熱量測定装置を用いて、校正ヒーターの発熱量と内部循環水の飽和温度差の関係から、JPDR の使用済燃料集合体の発熱量を約 8 W と求めた。

又、JMTR の使用済燃料について、校正ヒーターの発熱量と内部循環水の温度上昇率、又は、飽和温度差の関係を用いて、原子炉停止後 3 週間～ 5.5 ヶ月の燃料集合体の崩壊熱変化が求められた。

Measurement of Decay Heat from Spent Fuel Assemblies
of JPDR and JMTR

Kiyonobu MURAKAMI and Iwao KOBAYASHI⁺

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

(Received June 14, 1988)

The radiation decay heat from spent fuel assemblies are important design data for transportation casks, spent fuel storage systems. In order to prove the possibility to measure the decay heat, a thermal power measuring device was developed. The device consisted of two chambers for a spent fuel assembly and a calibration heater. The two chambers were connected by a pipe line, and contained water which was circulated by a pump.

The thermal power, 8 watt, generated from a spent fuel assembly of JPDR could be measured from the relation between the thermal power generated from the calibration heater and saturated temperature difference in the circulation loop.

Furthermore, the decay heat behavior for spent fuel assemblies unloaded from JMTR was measured for the interval three weeks through five months after shutdown of the reactor.

Keywords: Calorimeter, Spent Fuel, Fuel Assembly, JPDR Fuel Assembly,
JMTR Fuel Assembly

⁺ Department of Fuel Safety Research

目 次

1. はじめに	1
2. 測定装置	1
2.1 測定の原理	1
2.2 熱量測定装置	2
3. 発熱量測定	2
3.1 JPDRに於ける測定	2
3.2 JMTRに於ける測定	3
4. 測定結果と結果の検討	4
4.1 JPDRに於ける測定	4
4.2 JMTRに於ける測定	4
5. ま と め	5
謝 辞	5

Contents

1. Introduction	1
2. Experiment Device	1
2.1 Principle of Measurement	1
2.2 Calorimeter	2
3. Measurements of Decayheat	2
3.1 Measurement of JPDR Fuel Assembly	2
3.2 Measurement of JMTR Fuel Assembly	3
4. Result and Discussion	4
4.1 JPDR Fuel Assembly	4
4.2 JMTR Fuel Assembly	4
5. Conclusion	5
Acknowledgement	5

1. はじめに

核分裂から発生するエネルギーは、核分裂の際に核分裂生成物の運動エネルギー、中性子の運動エネルギー等即発的に放出されるものと、核分裂生成物がβあるいはα崩壊に伴って放出される遅発的なものがあり大部分は熱に変わる。

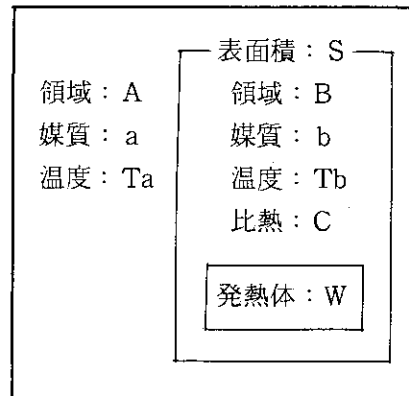
後者は崩壊熱と呼ばれ原子炉が停止した直後には原子炉出力の7%にも達するもので、時間とともに減衰するが原子炉の停止後も熱を放出し続ける。この崩壊熱を測定することは、燃料集合体の燃焼度を推定したり、燃料輸送時に使用する輸送容器の設計、使用済燃料の貯蔵施設の設計等に重要な情報を与える。しかし、この測定は核分裂生成物から発生する強力な放射線とともに、測定対象が大きいこともあって困難がともなうため、小さなサンプルレベルの報告はあるが、集合体そのものの測定は報告されていない。オンサイトにおける非破壊測定法開発の一環として、使用済燃料の崩壊熱の測定を取り上げ、測定の可能性を確かめるために装置の製作と測定を行なった。本装置の特徴は、使用済燃料集合体1体を容器内に装荷し、冷却水を循環させて、その温度上昇率又は飽和温度から放出エネルギーを求めるものである。

2. 測定装置

2.1 測定の原理

原子炉サイトにおける使用済燃料の発熱量の測定は、使用済燃料が深さ十数メートルの燃料貯蔵プールの水中に貯蔵保管されており、又その強力な放射線の為、絶対測定は装置が巨大となり困難であると考え相対測定法を採用した。

今、右の図の様に温度 T_a の媒質 a で満たされた領域 A があり、その中に閉じ込められた領域 B があり、その媒質 B の温度を T_b とする。領域 B の中に発熱体 W があるような体系に於いて、発熱体の出力が0の場合定常状態は、 $T_a = T_b$ である。この状態に於いて t_0 において、発熱体 W が一定の出力 P で発熱した時の過渡変化時の温度変化には、次の(1)式が適用できる。ただし、領域 A は十分に大きく、発熱による温度変化は無視出来るものとする。



$$dT_b/dt \propto \{ P - \rho S (T_b - T_a) \} / CV \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は領域 A から領域 B への熱伝達率、 S は領域 B の表面積、 C 領域 B の比熱及び V は領域 B の容積である。(1)式から、最大の温度変化率は $T_a = T_b$ 、すなわち $T = t_0$ の時に生

1. はじめに

核分裂から発生するエネルギーは、核分裂の際に核分裂生成物の運動エネルギー、中性子の運動エネルギー等即発的に放出されるものと、核分裂生成物が β あるいは α 崩壊に伴って放出される遅発的なものがあり大部分は熱に変わる。

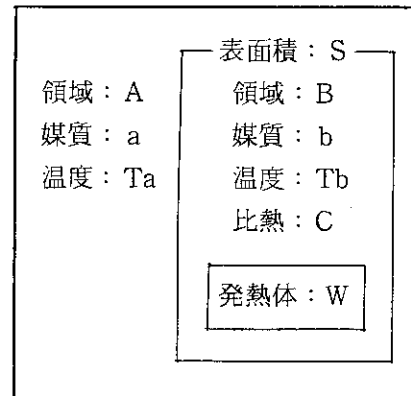
後者は崩壊熱と呼ばれ原子炉が停止した直後には原子炉出力の7%にも達するもので、時間とともに減衰するが原子炉の停止後も熱を放出し続ける。この崩壊熱を測定することは、燃料集合体の燃焼度を推定したり、燃料輸送時に使用する輸送容器の設計、使用済燃料の貯蔵施設の設計等に重要な情報を与える。しかし、この測定は核分裂生成物から発生する強力な放射線とともに、測定対象が大きいこともあって困難がともなうため、小さなサンプルレベルの報告はあるが、集合体そのものの測定は報告されていない。オンサイトにおける非破壊測定法開発の一環として、使用済燃料の崩壊熱の測定を取り上げ、測定の可能性を確かめるために装置の製作と測定を行なった。本装置の特徴は、使用済燃料集合体1体を容器内に装荷し、冷却水を循環させて、その温度上昇率又は飽和温度から放出エネルギーを求めるものである。

2. 測定装置

2.1 測定の原理

原子炉サイトにおける使用済燃料の発熱量の測定は、使用済燃料が深さ十数メートルの燃料貯蔵プールの中に貯蔵保管されており、又その強力な放射線の為、絶対測定は装置が巨大となり困難であると考え相対測定法を採用した。

今、右の図の様に温度 T_a の媒質 a で満たされた領域 A があり、その中に閉じ込められた領域 B があり、その媒質 B の温度を T_b とする。領域 B の中に発熱体 W があるような体系に於いて、発熱体の出力が0の場合定常状態は、 $T_a = T_b$ である。この状態に於いて t_0 において、発熱体 W が一定の出力 P で発熱した時の過渡変化時の温度変化には、次の(1)式が適用できる。ただし、領域 A は十分に大きく、発熱による温度変化は無視出来るものとする。



$$dT_b/dt \propto \{ P - \rho S (T_b - T_a) \} / CV \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 ρ は領域 A から領域 B への熱伝達率、 S は領域 B の表面積、 C 領域 B の比熱及び V は領域 B の容積である。(1)式から、最大の温度変化率は $T_a = T_b$ 、すなわち $T = t_0$ の時に生

ずる。また、最小の温度変化率は0で、 T_b が飽和温度 T_s に達した時である。この事から、もし発熱量と温度変化率、あるいは飽和温度の関係が求められておれば、領域Bに未知の発熱体が存在する場合に、温度変化率もしくは、飽和温度を求めることにより、未知の発熱体の発熱量を決定することができる。

2.2 熱量測定装置

熱量測定装置は、JPDRの燃料集合体（ $122\text{ mm}^D \times 1953.6\text{ mm}^L$ ）用として設計製作を行なった。装置は、燃料集合体が入るチェンバーと校正用ヒーターを内蔵したチェンバーが立っており、2つのチェンバーをつなぐ連絡管と、内部の水を循環させるポンプから構成されている。2つのチェンバーと連絡管は、熱の漏洩を少なくするため2重管構造にし、2重管内面は鏡面仕上げされ、間は空気層になっている。この空気層は真空ポンプにより排除することができ、さらに断熱効果を上げることが出来るようになっている。循環水の温度は、各チェンバーの入口と出口の計4箇所、温度計を取り付けて測定できる構造になっている。又、チェンバーに燃料集合体が入った場合と、校正用ヒーターを使用した場合に、内部水の温度上昇による浮力が同一方向に働くように、連結管をクロスさせた。内部の水は、循環ポンプにより、燃料集合体用チェンバー→連結管→校正ヒーター用チェンバー→連結管→循環ポンプの閉ループを流れる。循環ポンプは、内部水の流速を調整できるように、直流モーター駆動方式にした。装置の概念図を第1図に示す。

3. 発熱量測定

3.1 JPDRに於ける測定

(1) 燃料集合体（A-8）

測定対象とした燃料集合体（A-8）は、1963年10月～1969年9月までJPDR-1の炉心に装荷されており、集合体平均燃焼度が5,500 MWD/tである。JPDR-1の月間原子炉出力量を第2図に示す。

(2) 測定装置の設定

測定はJPDRの燃料貯蔵プール（ $3\text{ m}^W \times 7\text{ m}^L \times 7\text{ m}^D$ ）に装置を沈めて行なった。

燃料貯蔵プールは、プール水の浄化のため常時循環されているが、プール内の温度分布を安定に保つため、測定の期間中は浄化系を停止した。温度計の設置場所は、装置内部循環水の温度を測定するために集合体用チェンバーの出口と校正ヒーター用チェンバーの出口、プールの水温を測定するために集合体用チェンバーと校正ヒーター用チェンバーの中間の計3箇所とした。温度計には、水晶温度計を用いて $1/1000\text{ }^\circ\text{C}$ のレンジで測定した。循環ポンプの駆動電源には直流定電圧定電流発生装置を用いて、一定の流速に制御し、測定の期間中は変えないようにした。校正ヒーター用電源にも直流定電圧定電流発生装置を用い、発生熱量はデジタル・ボルトメーターと直流電圧電流計の測定値から算出した。この算出にあたって、電源から校正用ヒーターまでの

ずる。また、最小の温度変化率は0で、 T_b が飽和温度 T_s に達した時である。この事から、もし発熱量と温度変化率、あるいは飽和温度の関係が求められておれば、領域Bに未知の発熱体が存在する場合に、温度変化率もしくは、飽和温度を求めることにより、未知の発熱体の発熱量を決定することができる。

2.2 熱量測定装置

熱量測定装置は、JPDRの燃料集合体（ $122\text{ mm}^D \times 1953.6\text{ mm}^L$ ）用として設計製作を行なった。装置は、燃料集合体が入るチェンバーと校正用ヒーターを内蔵したチェンバーが立っており、2つのチェンバーをつなぐ連絡管と、内部の水を循環させるポンプから構成されている。2つのチェンバーと連絡管は、熱の漏洩を少なくするため2重管構造にし、2重管内面は鏡面仕上げされ、間は空気層になっている。この空気層は真空ポンプにより排除することができ、さらに断熱効果を上げることが出来るようになっている。循環水の温度は、各チェンバーの入口と出口の計4箇所、温度計を取り付けて測定できる構造になっている。又、チェンバーに燃料集合体が入った場合と、校正用ヒーターを使用した場合に、内部水の温度上昇による浮力が同一方向に働くように、連結管をクロスさせた。内部の水は、循環ポンプにより、燃料集合体用チェンバー→連結管→校正ヒーター用チェンバー→連結管→循環ポンプの閉ループを流れる。循環ポンプは、内部水の流速を調整できるように、直流モーター駆動方式にした。装置の概念図を第1図に示す。

3. 発熱量測定

3.1 JPDRに於ける測定

(1) 燃料集合体（A-8）

測定対象とした燃料集合体（A-8）は、1963年10月～1969年9月までJPDR-1の炉心に装荷されており、集合体平均燃焼度が5,500 MWD/tである。JPDR-1の月間原子炉出力量を第2図に示す。

(2) 測定装置の設定

測定はJPDRの燃料貯蔵プール（ $3\text{ m}^W \times 7\text{ m}^L \times 7\text{ m}^D$ ）に装置を沈めて行なった。

燃料貯蔵プールは、プール水の浄化のため常時循環されているが、プール内の温度分布を安定に保つため、測定の期間中は浄化系を停止した。温度計の設置場所は、装置内部循環水の温度を測定するために集合体用チェンバーの出口と校正ヒーター用チェンバーの出口、プールの水温を測定するために集合体用チェンバーと校正ヒーター用チェンバーの中間の計3箇所とした。温度計には、水晶温度計を用いて $1/1000\text{ }^\circ\text{C}$ のレンジで測定した。循環ポンプの駆動電源には直流定電圧定電流発生装置を用いて、一定の流速に制御し、測定の期間中は変えないようにした。校正ヒーター用電源にも直流定電圧定電流発生装置を用い、発生熱量はデジタル・ボルトメーターと直流電圧電流計の測定値から算出した。この算出にあたって、電源から校正用ヒーターまでの

ラインによる損失は無視した。

(3) 測定

測定対象の燃料集合体 (A-8) は、低燃焼度で長期間冷却されており、その発熱量は10W以下と推定されたため、発熱量は飽和温度による方法を用いて求めることにした。

測定は、先ず循環ポンプを一定の速度で回し、較正ヒーターの発熱量を変えて飽和温度を求めた。次に、燃料集合体を集合体用チェンバーに入れて飽和温度をもとめた。

3.2 JMTR に於ける測定

(1) 燃料集合体

測定対象とした燃料集合体は、第50サイクルの使用済燃料集合体から4体、第51サイクルの使用済燃料集合体から2体を選んだ。燃料集合体の燃焼履歴は第1表及び第3図に示すように、全て違うものを選んだ。燃料集合体の平均燃焼度は、24.9%～31.3%のものである。燃料集合体の図面を第4図に示す。

(2) 測定装置の設定

測定はJMTRのSFC (Spent Fuel Cutting) プール ($3\text{ m}^{\text{W}} \times 7\text{ m}^{\text{L}} \times 6.2\text{ m}^{\text{D}}$) に装置を沈めて行なった。本装置はJPDRの燃料集合体用として製作したため、JMTRの燃料集合体を保持し、循環水が集合体内を流れるように燃料ガイドを用いた。燃料ガイドは、燃料有効部中心と較正ヒーターの中心が同じ高さになるように製作した。その他の装置の設定や使用条件は、3.1のJPDRに於ける測定と同じであるが、循環ポンプの回転速度は、燃料集合体の発熱量が大きい事を考慮して早くした。

(3) 測定

測定対象の燃料集合体は、フルパワー運転の原子炉停止後約3週間と冷却期間が短いものと約3ヶ月と冷却期間のやや長いものがあるため、その発熱量は数百～100W程度と推定された。このため、発熱量の多い燃料集合体は温度上昇率による方法、発熱量の少ない燃料集合体は飽和温度による方法を用いて求めることにした。測定は、先ず循環ポンプを一定の速度で回しておき、較正ヒーターの発熱量を変えて飽和温度、温度の時間変化を測定し、発熱量と飽和温度の較正曲線、発熱量と温度変化率の較正直線を求めた。次に燃料集合体を装置に入れて循環水の温度変化、及び飽和温度を測定した。燃料集合体の発熱量変化は、全ての燃料について、2週間間隔で5点測定した。温度変化率による測定と飽和温度差による測定を検討する為に、1燃料集合体について両方の方法により発熱量を測定した。熱量測定装置に燃料集合体を挿入した時の温度変化の測定例を第5図に示す。

4. 測定結果と結果の検討

4.1 JPDR に於ける測定

発熱量と飽和温度の測定結果を第2表及び第6図に示す。当初、プールの大きさ及び屋内である事からプール水温の変化は小さいと考えていたが、第2表の測定結果に見られるように測定を11月～12月に行なったため、日々に水温が低下しておりその割合は $0.1^{\circ}\text{C}/\text{日}$ であった。このため、飽和温度そのものではなく、飽和温度とプール水温の温度差を飽和温度差として、これと校正ヒーターの発熱量との関係を用いることとした。

ここで、校正ヒーターの発熱量が0の時の飽和温度差が 0.281°C となっているのは、温度計の0点が違うのと、循環ポンプによる加熱のためである。発熱量と飽和温度差の関係を最小二乗法によりフィッティングし、次の(2)式を求めた。

$$\Delta T_s = (0.502 \cdot P + 93.229) \cdot 1/2 - 9.367 \quad \dots\dots\dots (2)$$

燃料集合体が入った時の飽和温度差は、 0.503°C と測定され、(2)式から発熱量は、 7.6 ± 0.3 Wと算出された。

この測定は11月～12月に行なったため、装置を設置した燃料貯蔵プールの水温が毎日低下している為、燃料貯蔵プールの水温が安定している時、あるいは室温との温度差が小さいときの測定値を用いたが、測定の時期を選ぶことが重要である。

4.2 JMTR に於ける測定

校正ヒーターの発熱量と、飽和温度差の測定結果を第3表及び第7図に示す。発熱量と飽和温度差の関係を最小二乗法によりフィッティングし、次の(3)式を求めた。

$$\Delta T_s = (17.603 \pm 0.724) \cdot \{1 - (0.98554 \pm 0.00199) \cdot \text{EXP} - (0.0013815 \pm 0.0000789) \cdot P\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(3)式のフィッティングには第3表の値を用いたが、同一の発熱量について2つの測定値があるときは、時間の経過している方を使用した。この2つの測定間の時間差は約24時間であり、測定値の違いは最大で 0.033°C ある。温度差 0.033°C は、発熱量の測定値に対して約2%の誤差を与える程度である。最初の測定値は校正ヒーターの設定を変化後約24時間後の値であり、この事から24時間程度待てば、循環水温度は飽和温度にはほぼ達しており、測定を行なっても測定に与える影響は小さい。

ある発熱量に於ける温度変化率は、次のようにして求めた。まず、校正ヒーターの電源投入後の時刻と温度差を測定し、これを $\Delta T = A \cdot (1 - B \cdot \text{EXP} - C \cdot t)$ の式に最小二乗法によりフィッティングした。次に、求めた式から $\Delta T = 0.233^{\circ}\text{C}$ (校正ヒーターが発熱していない時の

の飽和温度差)になる時刻を求め、この時刻に於けるフィッティング式の傾を、その発熱量に於ける温度変化率とした。校正ヒーターの発熱量と、温度変化率の測定結果を第4表及び第8図に示す。表には、フィッティングの結果の係数も示してある。発熱量と温度変化率の関係を最小二乗法によりフィッティングし、次の(4)式を求めた。

$$d\Delta T/dt \text{ (at } t=t) = 0.0083979 \pm 0.0094293 + \\ (0.0036326 \pm 0.0000195) \cdot P \quad \dots\dots\dots (4)$$

JMTRの使用済燃料集合体の飽和温度差及び温度変化率の測定結果を第5表及び第6表に示す。原子炉停止後の冷却期間と、発熱量の変化を第9図に示す。この図に於いて838N、803N及び829Nの最初の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、燃料集合体の移動によってSFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。また798N、836N、829N及び822Nの最後の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、使用済燃料を国外に搬出するための燃料カッティング準備作業が始められ、SFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。

JMTRに於ける測定は、JPDRに於ける測定経験を生かし、時期を選定した為、測定期間中に於けるSFCプール水温の変化は小さかった。しかし、校正曲線測定時と、燃料集合体の発熱量測定時で、大きく水温が変わっているのは、SFCプールはカナルを通じてJMTRの炉心とつながっており、燃料集合体の移動に伴って炉心の水温の高いものが入り込んだ為である。

5. ま と め

測定結果は、JPDRの使用済燃料集合体について約8W、及びJMTRのものについて約40～300Wであった。

熱量測定装置の製作及び実験を通して得られた測定上の留意上は下記の通りである。

- 1) 測定装置を設置するプールは十分に大きく、温度変化が少ないのが好ましく、測定時期を選ぶ必要がある。
- 2) 測定精度を上げるため装置内部の熱容量を小さくする必要がある。
- 3) 循環水は約24時間で、ほぼ飽和温度に達している。
- 4) 特別な装置でなくても、十分な精度で使用済燃料の発熱量が測定できた。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいた松浦祥次郎、鶴田晴通氏、および測定に御協力下さいました須崎武則、大野秋男、広瀬秀幸氏、及びJMTRに於ける測定にあたり、種々の御配慮下さいました市橋芳徳、廣原進、稲田征二氏、及び燃料の取り扱いをして下さいました原子炉一課の皆様に深く感謝致します。

の飽和温度差)になる時刻を求め、この時刻に於けるフィッティング式の傾を、その発熱量に於ける温度変化率とした。校正ヒーターの発熱量と、温度変化率の測定結果を第4表及び第8図に示す。表には、フィッティングの結果の係数も示してある。発熱量と温度変化率の関係を最小二乗法によりフィッティングし、次の(4)式を求めた。

$$d\Delta T/dt \text{ (at } t=t) = 0.0083979 \pm 0.0094293 + \\ (0.0036326 \pm 0.0000195) \cdot P \quad \dots\dots\dots (4)$$

JMTRの使用済燃料集合体の飽和温度差及び温度変化率の測定結果を第5表及び第6表に示す。原子炉停止後の冷却期間と、発熱量の変化を第9図に示す。この図に於いて838N、803N及び829Nの最初の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、燃料集合体の移動によってSFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。また798N、836N、829N及び822Nの最後の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、使用済燃料を国外に搬出するための燃料カッティング準備作業が始められ、SFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。

JMTRに於ける測定は、JPDRに於ける測定経験を生かし、時期を選定した為、測定期間中に於けるSFCプール水温の変化は小さかった。しかし、校正曲線測定時と、燃料集合体の発熱量測定時で、大きく水温が変わっているのは、SFCプールはカナルを通じてJMTRの炉心とつながっており、燃料集合体の移動に伴って炉心の水温の高いものが入り込んだ為である。

5. ま と め

測定結果は、JPDRの使用済燃料集合体について約8W、及びJMTRのものについて約40～300Wであった。

熱量測定装置の製作及び実験を通して得られた測定上の留意上は下記の通りである。

- 1) 測定装置を設置するプールは十分に大きく、温度変化が少ないのが好ましく、測定時期を選ぶ必要がある。
- 2) 測定精度を上げるため装置内部の熱容量を小さくする必要がある。
- 3) 循環水は約24時間で、ほぼ飽和温度に達している。
- 4) 特別な装置でなくても、十分な精度で使用済燃料の発熱量が測定できた。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいた松浦祥次郎、鶴田晴通氏、および測定に御協力下さいました須崎武則、大野秋男、広瀬秀幸氏、及びJMTRに於ける測定にあたり、種々の御配慮下さいました市橋芳徳、廣原進、稲田征二氏、及び燃料の取り扱いをして下さいました原子炉一課の皆様へ深く感謝致します。

の飽和温度差)になる時刻を求め、この時刻に於けるフィッティング式の傾を、その発熱量に於ける温度変化率とした。校正ヒーターの発熱量と、温度変化率の測定結果を第4表及び第8図に示す。表には、フィッティングの結果の係数も示してある。発熱量と温度変化率の関係を最小二乗法によりフィッティングし、次の(4)式を求めた。

$$d\Delta T/dt \text{ (at } t=t) = 0.0083979 \pm 0.0094293 + \\ (0.0036326 \pm 0.0000195) \cdot P \quad \dots\dots\dots (4)$$

JMTRの使用済燃料集合体の飽和温度差及び温度変化率の測定結果を第5表及び第6表に示す。原子炉停止後の冷却期間と、発熱量の変化を第9図に示す。この図に於いて838N、803N及び829Nの最初の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、燃料集合体の移動によってSFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。また798N、836N、829N及び822Nの最後の測定値が他の測定値の傾向から外れているのは、使用済燃料を国外に搬出するための燃料カッティング準備作業が始められ、SFCプールの水が攪拌され、定常状態の温度バランスが崩れた為と考えられる。

JMTRに於ける測定は、JPDRに於ける測定経験を生かし、時期を選定した為、測定期間中に於けるSFCプール水温の変化は小さかった。しかし、校正曲線測定時と、燃料集合体の発熱量測定時で、大きく水温が変わっているのは、SFCプールはカナルを通じてJMTRの炉心とつながっており、燃料集合体の移動に伴って炉心の水温の高いものが入り込んだ為である。

5. ま と め

測定結果は、JPDRの使用済燃料集合体について約8W、及びJMTRのものについて約40～300Wであった。

熱量測定装置の製作及び実験を通して得られた測定上の留意上は下記の通りである。

- 1) 測定装置を設置するプールは十分に大きく、温度変化が少ないのが好ましく、測定時期を選ぶ必要がある。
- 2) 測定精度を上げるため装置内部の熱容量を小さくする必要がある。
- 3) 循環水は約24時間で、ほぼ飽和温度に達している。
- 4) 特別な装置でなくても、十分な精度で使用済燃料の発熱量が測定できた。

謝 辞

この実験の計画および実施にあたり、有意義な御指導、御鞭撻をいた松浦祥次郎、鶴田晴通氏、および測定に御協力下さいました須崎武則、大野秋男、広瀬秀幸氏、及びJMTRに於ける測定にあたり、種々の御配慮下さいました市橋芳徳、廣原進、稲田征二氏、及び燃料の取り扱いをして下さいました原子炉一課の皆様に深く感謝致します。

第1表 JPDRに於ける測定結果

Date	Calibration Meter Power (w)	Pool water Temperature T_w ($^{\circ}\text{C}$)	Calorimeter Temperature T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	Calorimeter Temperature T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature Difference ΔT_s ($^{\circ}\text{C}$)	Note
Nov. 8, '78	0	20.195	20.380	20.572	0.281	
Nov. 21, '78	32.3	18.284	19.289	19.466	1.093	
Nov. 24, '78	15.8	17.797	18.408	18.591	0.703	
Nov. 29, '78	49.72	17.247	18.665	18.833	1.502	
Dec. 1, '78	72.38	16.992	18.921	19.081	2.009	
Dec. 4, '78	99.97	16.756	19.297	19.440	2.613	
Dec. 20, '78	0	14.972	15.382	15.572	0.503	A-8 Fuel Assembly

第2表 JMTR 燃料集合体の照射履歴

Fuel Assembly	JMTR Operation Cycl number and Operation Time									
	47		48		49		50		51	
	前半サイクル 6/18 15:00 ~6/29 15:05	後半サイクル 7/2 15:13 ~7/13 01:10	前半サイクル 11/12 22:10 ~11/23 15:05	後半サイクル 11/26 17:23 ~12/7 10:36	前半サイクル 1/19 01:45 ~1/27 15:03	後半サイクル 1/30 15:10 ~2/10 10:38	前半サイクル 3/4 15:10 ~3/14 14:05	後半サイクル 3/18 13:05 ~3/29 10:35	前半サイクル 5/16 20:35 ~5/23 09:19	後半サイクル 5/25 12:45 ~5/27 15:05
822N				(H-6) 26.2		(H-10) 25.0	(F-9) 31.3			
829N				(K-9) 25.1		(F-8) 33.0	(J-8) 26.9			
798N		(G-7) 30.7	(F-9) 29.9				(F-6) 24.8			
836N		(J-7) 23.4	(H-6) 26.2			(G-9) 29.1	(L-8) 24.7	(H-8) 29.8		
803N									(F-7) 30.8	
838N						(I-7) 24.6	(L-8) 24.7	(F-10) 22.7		

(A-I) : 燃料集合体の炉心内表筒位置
 NN.N : 炉心内筒筒位置に於ける熱中性子束 ($\times 10E12$ N/cm² · sec)

第3表 JMTR に於ける飽和温度差校正曲線測定結果

Date	Calibration Meter Power (w)	Pool water Temperature T_w ($^{\circ}\text{C}$)	Calorimeter Temperature T_1 ($^{\circ}\text{C}$)	Calorimeter Temperature T_2 ($^{\circ}\text{C}$)	Temperature Difference ΔT_s ($^{\circ}\text{C}$)	Note
May 16, '80	0	20.100	20.252	20.413	0.233 ± 0.001	
May 20, '80	50.3 ± 0.06	19.829	21.257	21.396	1.498 ± 0.004	
May 21, '80	50.3 ± 0.06	19.835	21.256	21.394	1.490 ± 0.001	
May 22, '80	104.69 ± 0.01	19.848	22.367	22.489	2.580 ± 0.006	
May 23, '80	104.76	19.879	22.413	22.532	2.594 ± 0.001	
May 26, '80	156.42	19.914	23.424	23.540	3.569 ± 0.001	
May 27, '80	202.15 ± 0.2	20.152	24.563	24.658	4.458 ± 0.004	
May 28, '80	202.15 ± 0.2	20.164	25.557	24.647	4.438 ± 0.004	
May 29, '80	253.87 ± 0.13	20.182	25.508	25.590	5.368 ± 0.003	
May 30, '80	253.87 ± 0.13	20.204	25.534	25.615	5.371 ± 0.001	
June 2, '80	310.9 ± 0.85	20.348	26.646	26.734	6.334 ± 0.019	
June 3, '80	339.52 ± 0.62	20.732	27.521	27.603	6.847 ± 0.030	
June 4, '80	339.52 ± 0.62	20.772	27.549	27.624	6.814 ± 0.005	
June 6, '80	515.2	24.570	33.621	33.642	9.064 ± 0.007	

第4表 JMTRに於ける温度上昇率校正曲線測定結果

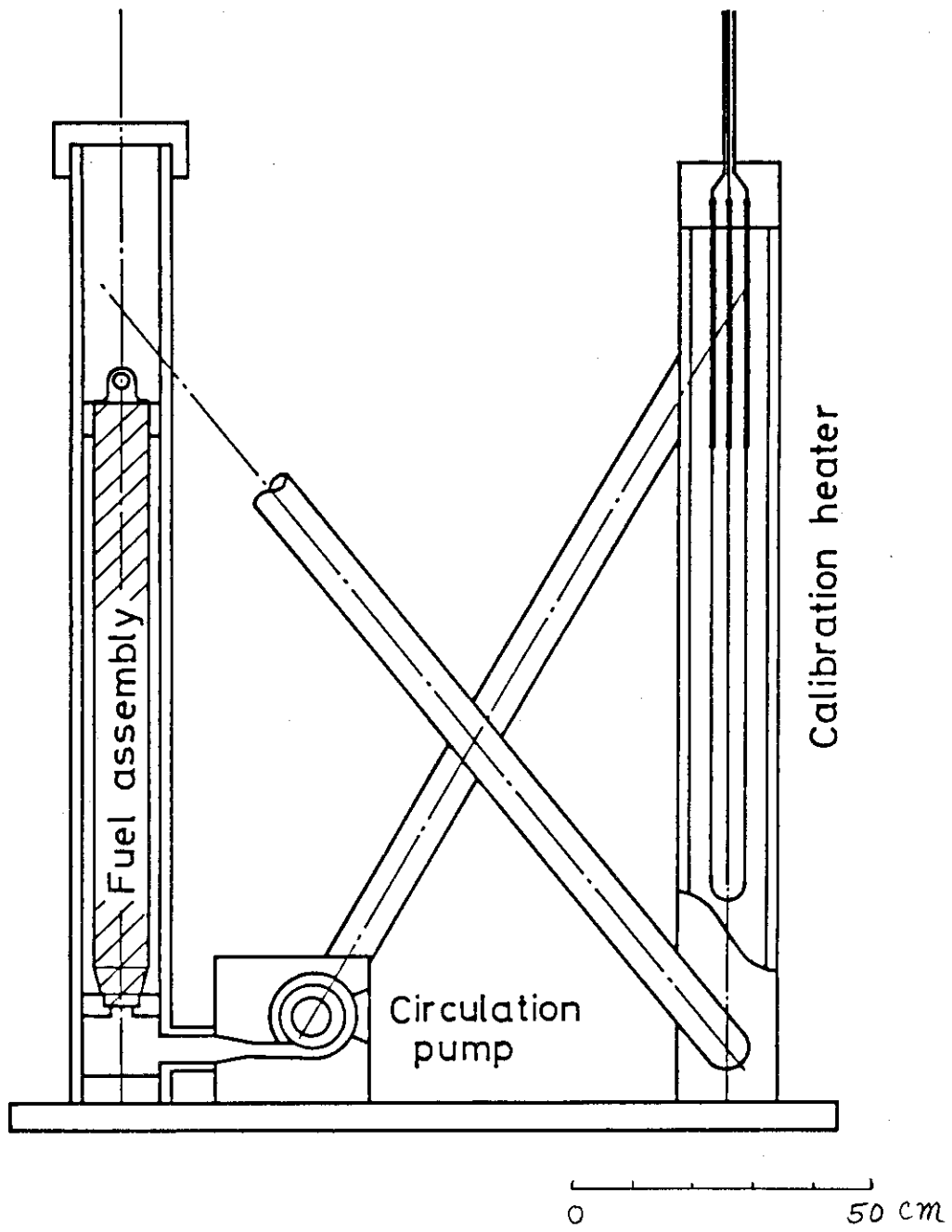
Date	Calibration Heter Power (w)	Pool water Temperature T _w (°C)	Temperature Increasing ratio (°C/Hr)	Coefficient of Temperature Fitting Function		
				Coefficient A	Coefficient B	Coefficient C
June 11, '80	497.6 ± 0.0	21.055	1.8177	10.231 ± 0.0381	7.6627 ± 0.1043	0.1818 ± 0.0012
June 13, '80	973.97 ± 0.81	21.205	3.5391	17.529 ± 0.0752	7.3855 ± 0.1230	0.2046 ± 0.0016
July 3, '80	394.71 ± 0.63	26.838	1.4644	7.7863 ± 0.0212	6.3784 ± 0.0647	0.1939 ± 0.0010
July 17, '80	98.64 ± 0.10	26.629	0.3747	2.3961 ± 0.0068	5.2426 ± 0.0354	0.1827 ± 0.0007
July 31, '80	202.2 ± 0.21	26.855	0.7268	4.3950 ± 0.0387	5.5569 ± 0.1594	0.1746 ± 0.0028

第5表 J M T R 使用済燃料の飽和温度差による発熱量測定結果

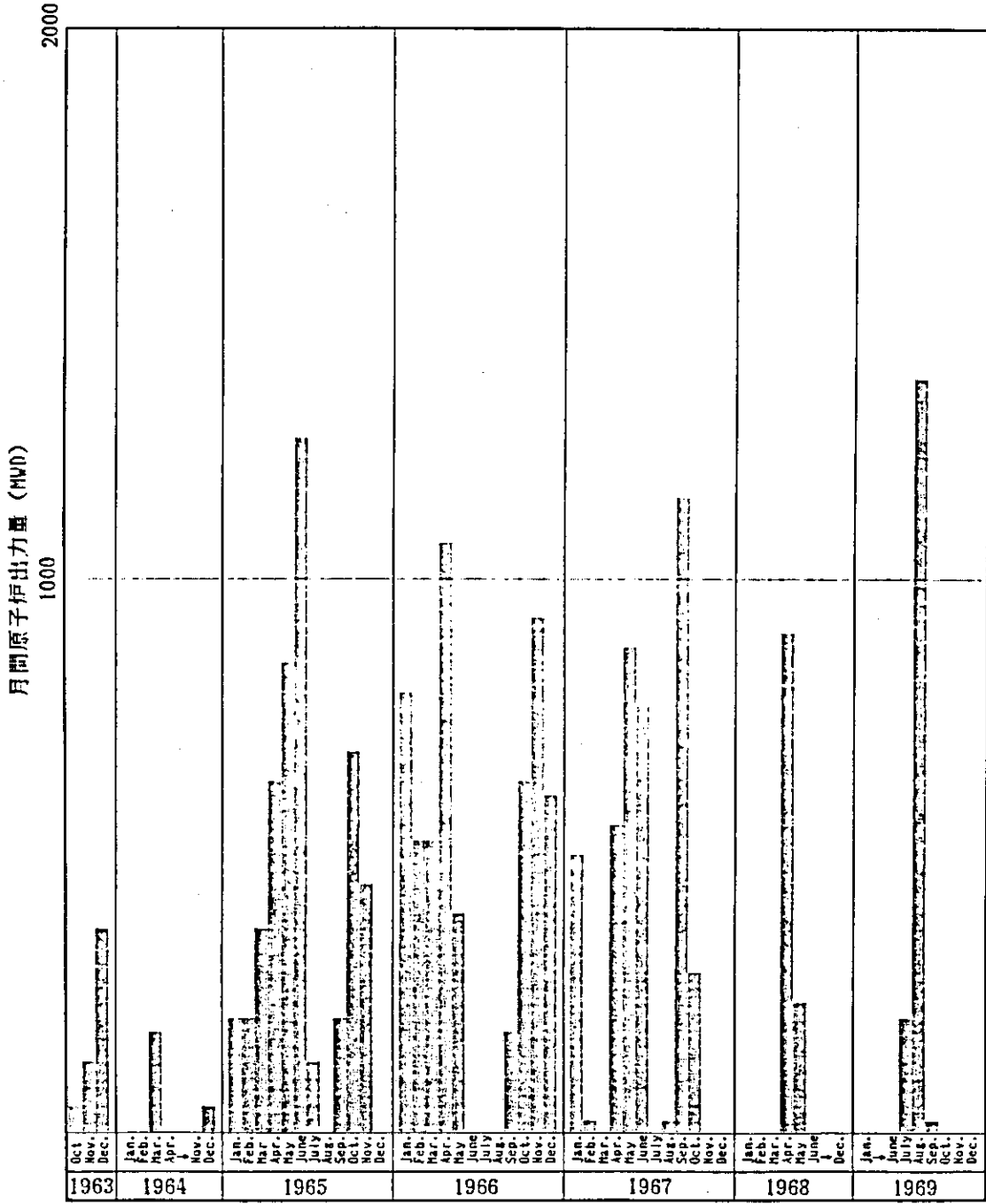
Date	Time Hr:min	Fuel Assembly Number	Pool water Temperature T _w (°C)	Calorimeter Temperature T ₁ (°C)	Calorimeter Temperature T ₂ (°C)	Temperature Difference ΔT _s (°C)	Assembly Decay Heat Power (W)	Note
June 23, '80	9:20	829N	26.513	30.140	30.318	3.716 ± 0.001	161.1	
June 24, '80	15:30	798N	26.564	29.047	29.214	2.567 ± 0.001	103.6	
June 25, '80	14:40	798N	26.572	29.034	29.201	2.546 ± 0.002	102.5	
July 7, '80	9:20	829N	26.777	30.077	30.251	3.387 ± 0.001	144.1	
July 8, '80	14:45	798N	26.755	28.991	29.157	2.319 ± 0.002	91.7	
July 9, '80	14:50	798N	26.745	28.962	29.129	2.301 ± 0.002	90.9	
July 10, '80	14:50	836N	26.694	30.565	30.747	3.962 ± 0.003	174.0	
July 11, '80	15:00	836N	26.697	30.555	30.740	3.950 ± 0.002	173.4	
July 14, '80	9:10	822N	26.664	29.418	29.593	2.842 ± 0.000	116.9	
July 21, '80	9:20	829N	26.599	29.498	29.675	2.988 ± 0.000	124.1	
July 22, '80	15:00	798N	26.689	28.672	28.840	2.067 ± 0.001	79.9	
July 23, '80	15:10	798N	26.762	28.714	28.880	2.035 ± 0.001	78.4	
July 24, '80	15:00	836N	26.839	30.222	30.402	3.473 ± 0.003	148.5	
July 25, '80	15:10	836N	26.898	30.278	30.460	3.472 ± 0.002	148.5	
July 28, '80	9:15	822N	26.913	29.387	29.559	2.561 ± 0.000	103.3	
Aug. 4, '80	9:15	829N	26.504	29.013	29.184	2.594 ± 0.002	104.9	
Aug. 5, '80	15:00	798N	26.410	28.228	28.392	1.899 ± 0.002	72.1	
Aug. 6, '80	15:20	798N	26.318	28.118	28.284	1.883 ± 0.001	71.4	
Aug. 7, '80	15:20	836N	26.224	29.255	29.434	3.121 ± 0.002	130.7	
Aug. 8, '80	15:10	836N	26.162	29.170	29.348	3.099 ± 0.002	129.6	
Aug. 11, '80	9:15	822N	26.011	28.200	28.373	2.275 ± 0.001	89.6	
Aug. 18, '80	9:25	829N	26.059	28.237	28.416	2.268 ± 0.001	89.3	
Aug. 19, '80	15:50	798N	26.113	27.638	27.811	1.611 ± 0.001	58.9	
Aug. 22, '80	15:15	836N	26.103	28.328	28.515	2.317 ± 0.004	91.6	
Aug. 25, '80	9:15	822N	26.202	27.961	28.140	1.848 ± 0.002	69.7	

第6表 JMTR 使用済燃料の温度上昇率による発熱量測定結果

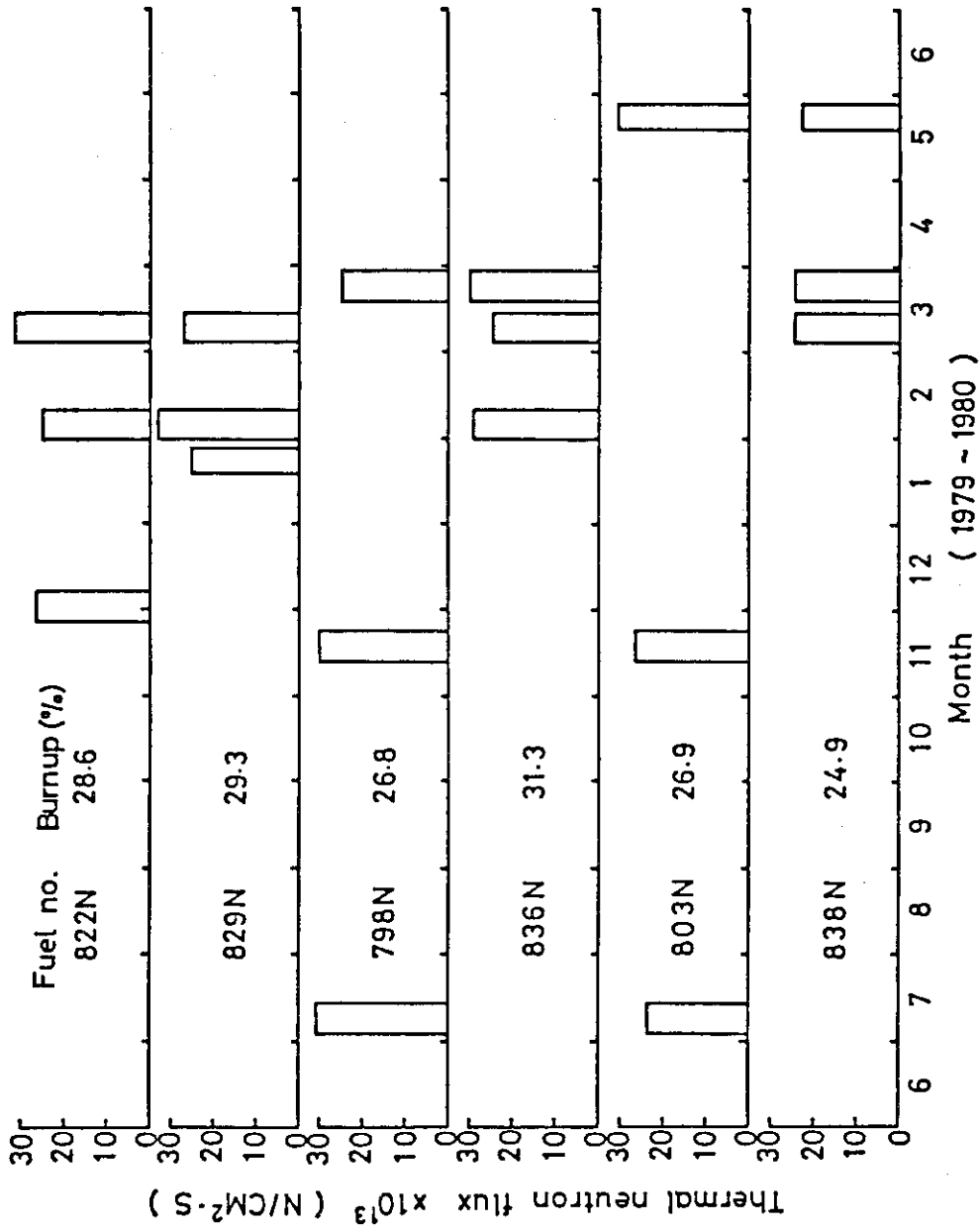
Date	Time Hr:min	Fuel Assembky Number	Pool water Temperature T _w (°C)	Temperature increasing ratio (°C/Hr)	Assembly Decy Heat (w)	Note
June17, '80	10:31	838N	26.843	1.245	340.4	
June18, '80	9:52	803N	26.758	1.124	307.1	
June19, '80	9:52	829N	26.645	0.6547	177.9	
June26, '80	9:34	836N	26.585	0.8040	219.0	
June27, '80	9:40	822N	27.493	0.5180	140.3	
July 1, '80	9:40	838N	27.042	1.0487	286.4	
July 2, '80	9:42	803N	26.952	0.8145	221.9	
July 4, '80	9:54	829N	26.799	0.5926	160.8	
July15, '80	9:42	838N	26.693	0.8037	218.9	
July16, '80	9:40	803N	26.688	0.5845	158.6	
July18, '80	9:43	829N	26.560	0.5105	138.2	
July29, '80	10: 7	838N	26.925	0.6573	178.6	
July30, '80	9:41	803N	26.878	0.4504	121.7	
Aug. 1, '80	9:59	829N	26.813	0.4412	119.1	
Aug.12, '80	9:48	838N	26.026	0.5629	152.7	
Aug.13, '80	9:43	803N	26.011	0.3830	103.1	
Aug.15, '80	9:38	829N	26.043	0.3968	106.8	



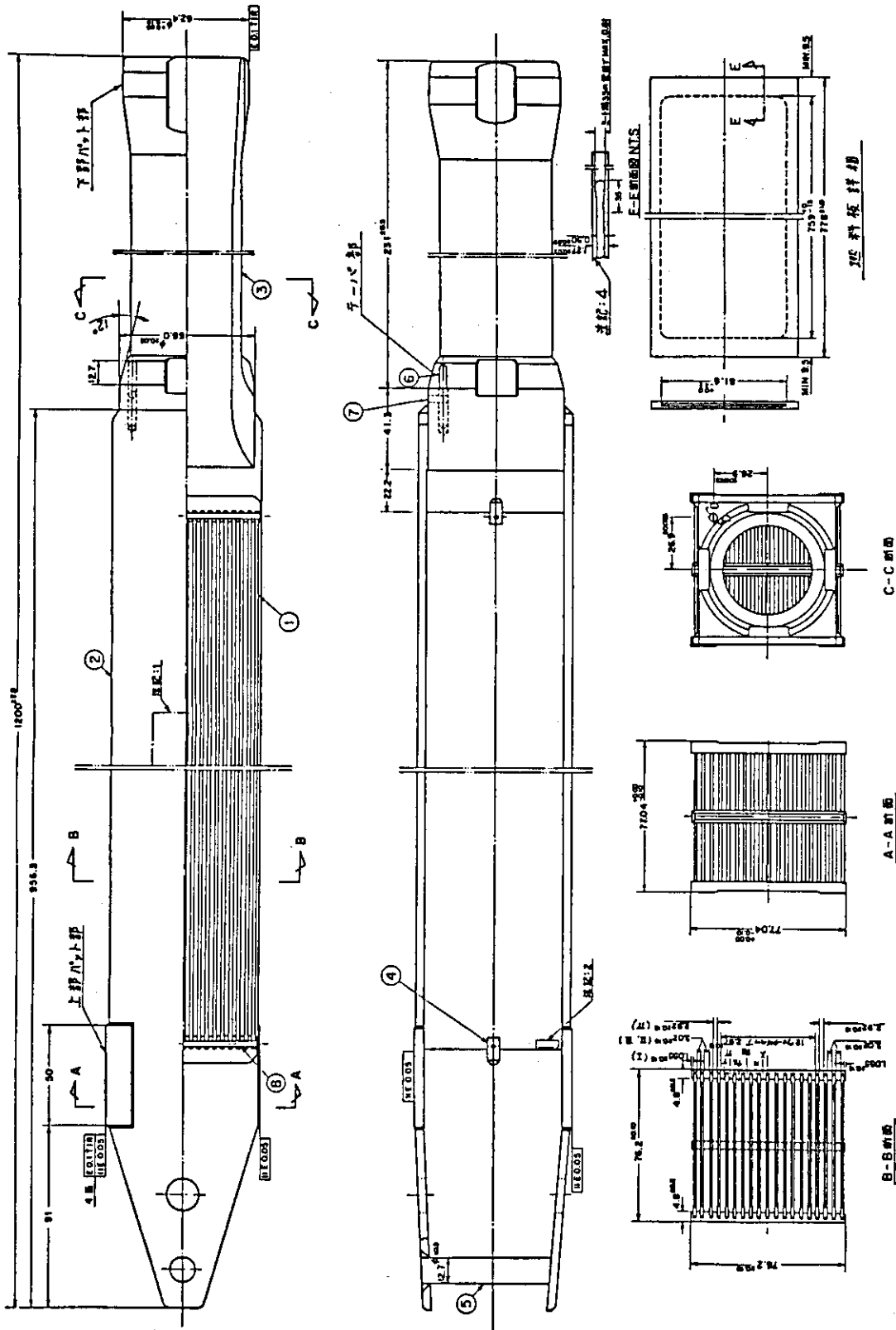
第1图 热量测定装置概念图



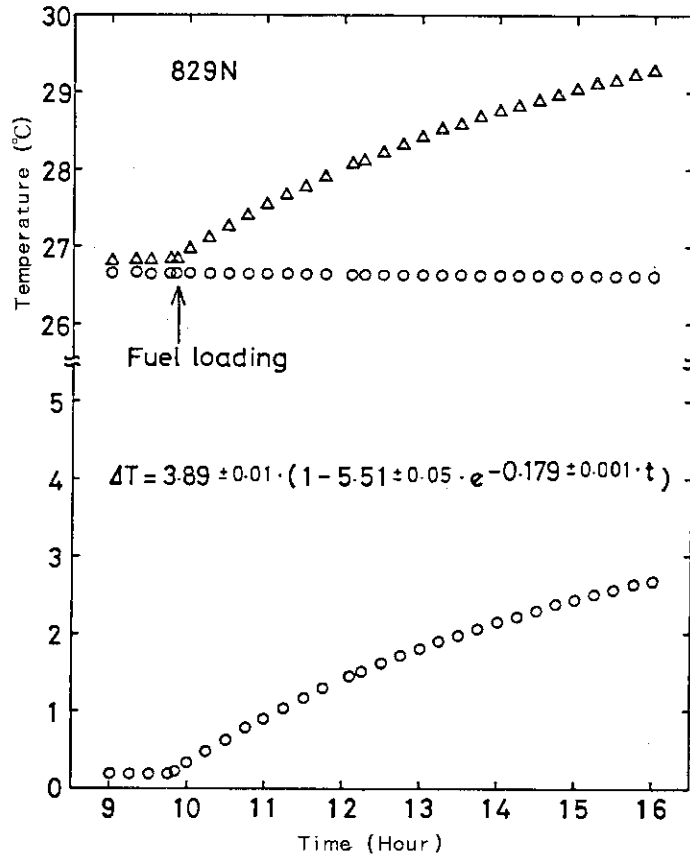
第2図 JPDRの月間原子炉出力量



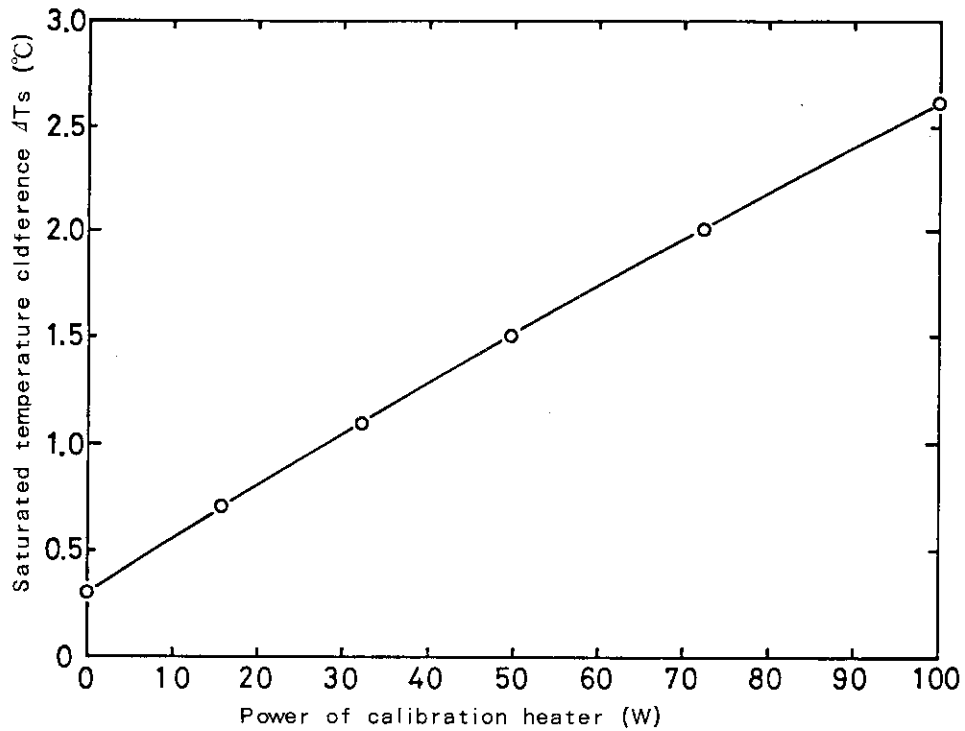
第3図 JMTRに於ける測定燃料の照射履歴



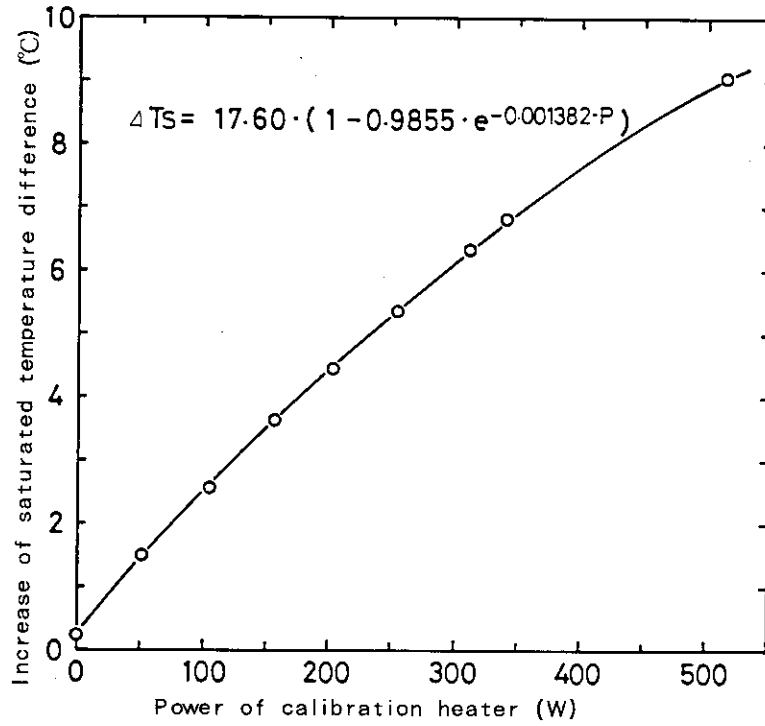
第4図 JMTRの燃料集合体



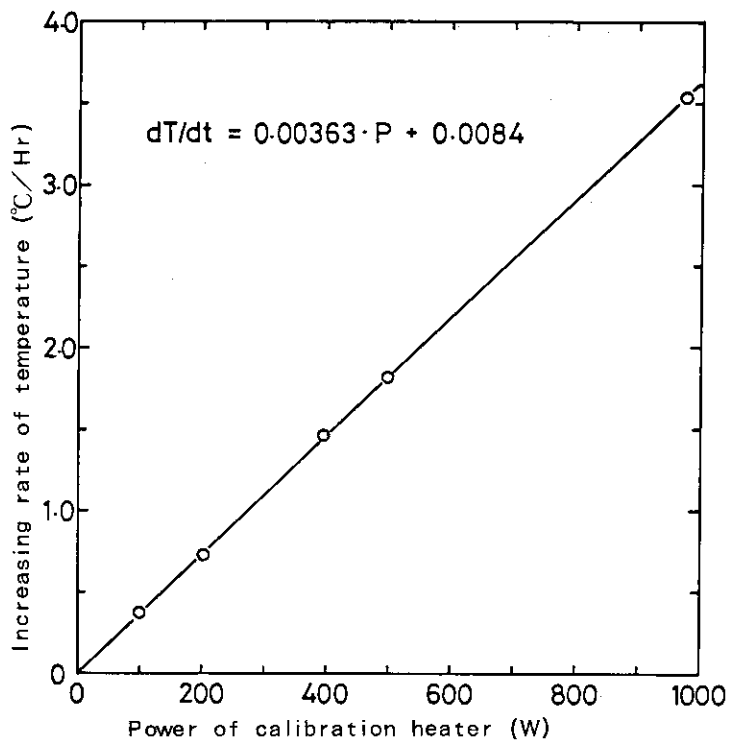
第5図 温度変化の測定例(829N)



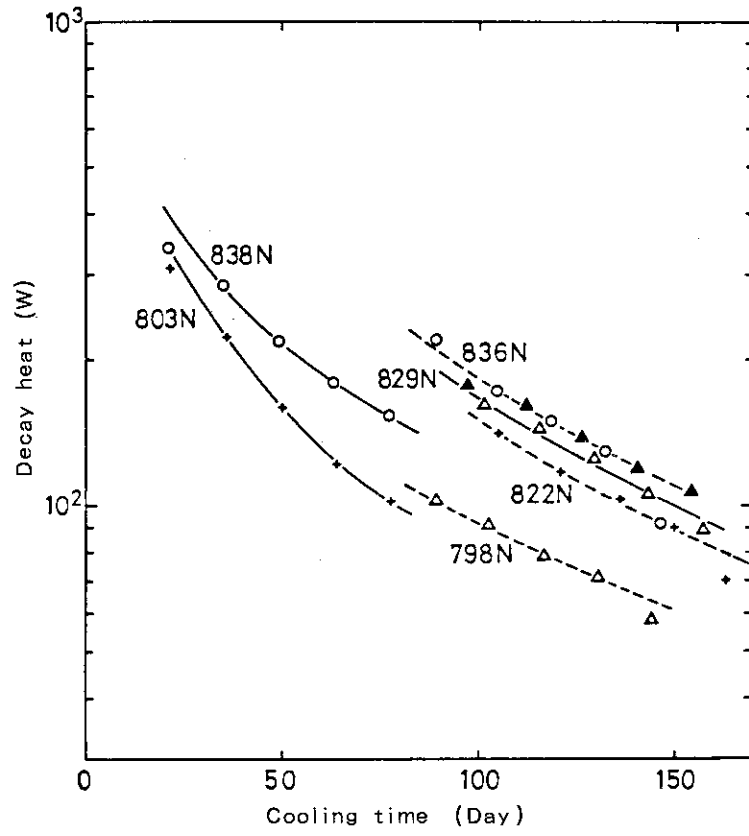
第6図 JPDRに於ける校正ヒーター出力と飽和温度差



第7図 JMTRに於ける校正ヒーター出力と飽和温度差



第8図 JMTRに於ける校正ヒーター出力と温度変化率



第9図 JMTR 使用済燃料の発熱変化