

JAERI-Tech

JP0350091

2003-028



熱外中性子検出によるTRACY超臨界実験の
出力履歴の測定

2003年3月

中島 健・柳澤 宏司・三好 慶典

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）で複写による実費領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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

熱外中性子検出による TRACY 超臨界実験の出力履歴の測定

日本原子力研究所東海研究所安全性試験研究センター燃料サイクル安全工学部
中島 健・柳澤 宏司⁺・三好 慶典

(2003 年 1 月 31 日受理)

TRACY を用いた超臨界実験における出力履歴を精度良く測定するために、熱外中性子検出による出力測定を試みた。熱外中性子の測定のために、カドミウム (Cd) 被覆の ^{235}U 核分裂電離箱を使用し、中性子検出効率を向上させるための中性子減速材としてポリエチレンを Cd 被覆内に設置した。また、ガンマ線によるノイズの影響を低減するために鉛遮蔽体を設けた。

測定結果を熱中性子検出器の結果と比較したところ、従来の熱中性子検出では中性子が検出器に到達するまでの飛行時間によって生じる時間遅れの影響により出力に歪みが生じ、また、出力ピーク値が減少することが明らかになった。出力ピーク値の減少率は、添加反応度 1.5\$ の比較的ゆっくりとした出力変化の場合には約 4% であったが、反応度が約 3\$ の高速出力変化では、40% 以上と大きくなつた。

Measurements of Power Profile in TRACY Supercritical Experiment
by Detecting Epithermal Neutrons

Ken NAKAJIMA, Hiroshi YANAGISAWA[†] and Yoshinori MIYOSHI

Department of Fuel Cycle Safety Research
Nuclear Safety Research Center
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 31, 2003)

We have tried to measure the power profile in the TRACY supercritical experiment with high accuracy by detecting epithermal neutrons. In order to measure the epithermal neutrons, a cadmium covered ^{235}U fission chamber was used, and a neutron moderator of polyethylene, was set inside the cadmium to enhance the neutron detection efficiency. In addition, a lead shield was used to reduce the noise current due to gamma-rays.

The measured results were compared with the ones using a thermal neutron detector, and it was found that the time delay effect in the thermal neutron detection, which was caused by the flight time of neutrons to reach the detector, distorted the power profile and reduced its peak value. The reduction ratio of peak power was about 4% for the relatively slow power change with the inserted reactivity of 1.5\$, but it became more than 40% for the rapid power change with the reactivity of about 3\$.

Keywords: TRACY, Power Profile Measurements, Epithermal Neutron Detection, ^{235}U Fission Chamber, Gamma-ray Shield, Time Delay Effect, Peak Power Reduction

[†] Department of Safety Research Technical Support

目 次

1.はじめに	1
2.中性子フィルターの効果	3
2.1 概要	3
2.2 フィルター効果の測定	3
2.3 出力振動について	5
2.4 まとめ	6
3.熱外中性子検出による出力履歴の測定結果	15
3.1 概要	15
3.2 測定結果	15
3.3 まとめ	16
4.まとめ	24
参考文献	24
付録1:TRACYの概要	26
付録2:実験一覧	28
付録3:熱外中性子検出系の測定条件	29

Contents

1. Introduction	1
2. Effect of Neutron Filters	3
2.1 Outline	3
2.2 Measurements of Filter Effect	3
2.3 On the Power Oscillation	5
2.4 Summary	6
3. Results of Power Profile Measurement by Detecting Epithermal Neutrons	15
3.1 Outline	15
3.2 Results of Measurement	15
3.3 Summary	16
4. Summary	24
References	24
Appendix 1: Outline of TRACY	26
Appendix 2: List of Experiments	28
Appendix 3: Measurement Conditions of Epithermal Neutron Detection System	29

This is a blank page.

1. はじめに

再処理工場などで取り扱われる溶液状核燃料物質の臨界事故時¹⁾の挙動を調べるために、日本原子力研究所（以下、原研）では、過渡臨界実験装置 TRACY を用いた一連の臨界事故模擬実験（超臨界実験）を実施している²⁻⁶⁾。TRACY では、硝酸ウラニル水溶液 (^{235}U 濃縮度 9.98wt%）を燃料とし、最大 3\$までの反応度を添加した超臨界実験を行い、出力、温度、圧力の時間変化の測定を行っている。このうち、出力の測定では、TRACY 炉心タンクから約 10m 離れた炉室天井部に設置した ^{235}U 核分裂電離箱を用いて中性子を検出している。 ^{235}U は熱領域で大きな核分裂断面積を有しているために、出力測定で検出される中性子も熱中性子が主となる（図 2-1 参照）。温度 300K の Maxwell 分布を有する熱中性子の最確速度は、よく知られているように 2200m/s であり、10m を飛行するのに約 4.5ms の時間がかかる。一方、TRACY で測定される出力は、最大反応度である 3\$をステップ状に添加した場合には、約 3ms の炉周期で変化する。このため、熱中性子検出による測定方法では、中性子飛行に伴う検出の時間遅れが無視できないこととなる。この出力測定における検出時間遅れの影響を排除し、精度の良い出力測定を行うための方法の一つとして、ガンマ線検出による出力測定が柳澤等によって行われた⁷⁻⁹⁾。これは、高速の応答性を有するガンマ線電離箱により、時間遅れの無い出力変化を測定するものである。この測定により、急激に変化する出力では、従来の測定手法が時間遅れの影響を受けていることが実験的に明らかとなった。また、出力のパルス部については、ガンマ線検出により精度の良い測定が行えることが示された。しかしながら、核分裂に伴い発生するガンマ線は、核分裂と同時に発生する即発ガンマ線の他に、核分裂生成物（FP）の崩壊に伴い発生する FP ガンマ線があり、後者は FP の半減期に従った時間遅れ伴って発生する。このため、ある程度の時間が経過した後には、FP ガンマ線の寄与が測定に影響を与えることとなる。特に、パルス終了後は、パルス部で生成した大量の FP が存在していることと、中性子束レベルが比較的小さくなっていることにより、FP ガンマ線の寄与割合が大きくなり、出力測定への影響が無視しえなくなってしまう¹⁰⁾。このため、パルス終了後も含めた出力変化全体についての精度の良い測定は不可能となる。

本研究では、出力に比例した量である中性子を時間遅れなく検出するために、熱外中性子検出による出力測定法を試みた。この測定では、検出器は従来と同じ ^{235}U 核分裂電離箱を使用するが、これを熱中性子吸収体であるカドミウムで被覆することにより、熱外中性子のみを検出されるものである。カドミウムのカットオフエネルギー（吸収できる熱中性子の上限エネルギー）は 0.5eV 程度であり、測定される熱外中性子の最低速度は 9800m/s となる。この場合に、10m 位置での時間遅れは最大で 1ms となるが、実際には ^{235}U の核分裂断面積が 1eV 以上で共鳴を有している（図 2-1）ことから、検出される中性子の実効的なエネルギーはより大きくなり、その分時間遅れも小さくなると考えられる。また、現在、

出力測定に使用している検出器は運転時の出力モニタとして校正されているために、設置位置の変更は運転管理上困難であるが、実験系として設置する熱外中性子検出器では設置位置の変更が容易である。このため、炉心から検出器までの距離を短くすることにより、時間遅れの影響を排除することが可能となる。また、出力に比例している中性子を検出していることから、ガンマ線検出と異なり、出力変化全体について精度の良い測定が可能になるものと考えられる。ただし、後述するように、このためには検出器に対するガンマ線の影響を十分に小さくすることが必要となる。

本報告書では、時間遅れの小さい出力測定を行うために実施した熱外中性子検出による出力履歴の測定についてまとめたものである。第2章では、熱外中性子検出のために用いたカドミウムを含む中性子フィルターの効果について述べる。第3章では、熱外中性子検出による出力履歴の測定結果について述べる。最後に、本報告のまとめと今後の課題を示す。

2. 中性子フィルターの効果

2.1 概 要

熱外中性子の検出は、検出器を熱中性子吸収体であるカドミウム（Cd）で覆うことにより行った。図 2-1 に示すように、 ^{235}U は熱領域で大きな核分裂断面積を有している¹¹⁾ため、熱中性子を Cd で遮蔽することにより、中性子の検出効率が大きく低下してしまう。この結果、相対的にガンマ線により生ずるノイズの影響が大きくなる。この影響を小さくするために、以下の二つの措置を講じた。

1) 中性子検出効率の増加

Cd 被覆を透過した熱外中性子を熱中性子に減速させることにより、検出効率を増大させる。このために、Cd 被覆の下に、中性子減速材であるポリエチレンで検出器を囲んだ。減速効果で熱外中性子の検出効率が増大することにより、検出可能な中性子の平均エネルギーが実効的に高くなるため、より時間遅れの少ない測定を行うことが出来る。

2) ガンマ線の遮蔽

ガンマ線を遮蔽するために、鉛（Pb）遮蔽体を設置した。

以上の Cd、ポリエチレン、鉛を組み合わせたフィルターの効果を TRACY 実験により調べた。

2.2 フィルター効果の測定

以下に示す 3 ケースのフィルターを使用した場合の、TRACY 実験における検出器応答（電流値）を測定した。本測定で使用したフィルターの一覧を表 2-1 に、各フィルターの構造の概略を図 2-2 に示す。

Case①：検出器を 0.5mm 厚の Cd のみで被覆した。

Case②：検出器を 10mm 厚ポリエチレンで囲い、その外側を 1mm 厚 Cd で被覆、最外周に 50mm 厚鉛を設置した。

Case③：Case②において、ポリエチレン厚さを 20mm、鉛厚さを 100mm とした。

TRACY の運転は、約 3\$ の反応度を有する調整トランジエント棒を瞬時に引き抜くことによりステップ状の反応度添加を行う「パルス引抜モード」で実施している（TRACY の運転モードについては付録 1 を参照のこと。また、本測定条件の詳細は付録 2 に示してある）。測定結果を、図 2-3、2-4 に示す。図中の時間は、調整トランジエント棒引き抜き開始からの経過時間である。なお、図の測定結果は、別々の運転において上記①～③のフィルターを取り付けた検出器をほぼ同一の位置に設置して行ったものである。また、各ケース間の比較を行うために、Case①及び Case②に対する Case③の比（③/①、③/②）の時間変化を図 2-5、2-6 に示す。

パルスの立ち上がり部（図 2-4）をみると、Case①（Cd 被覆のみ）に比べて、他のケースでは信号電流が大きくなっている、ポリエチレンにより検出効率が増大している様子がわかる。図 2-6 に示す電流比の変化では、電流が流れ始める際に過渡的な変動がみられるが、その後のパルス立ち上がり部（約 0.16～0.18 秒の間）では比較的安定しており、Case③は Case①に比べて約 10 倍、Case②の約 3 倍の電流が流れていることがわかる。（立ち上がり部において、電流比が増加しているが、これは添加した反応度量が実験により若干異なっていることが原因である（Case①及び②：2.93\$、Case③2.97\$）。一方、立下り部では、電流比は急激に減少しており、時間約 0.2 秒以降は電流比 1～2 程度となっている。この電流比は、本来ならば測定領域全体にわたり一定値となるべきであるが、パルスのピーク以降は FP ガンマ線の影響が顕著となっているために、このような変化を示しているものと考えられる。すなわち、パルスの立ち上がり部で生成された FP が、その半減期に応じた時間遅れをもって崩壊する際に放出したガンマ線を Case①や②では検出していることとなる。図 2-5 に示すように、パルス終了後は時間の経過とともに電流比が増加しており、③/②では、約 1.5 秒経過後にはほぼパルス立ち上がり時の電流比に回復し、FP ガンマ線の影響がほぼ無くなっていることがわかる。一方、鉛遮蔽体の無い Case①との比である③/①では、1.5 秒の時点でも FP ガンマ線の影響が無視し得ないことがわかる。

パルスのピーク部では Case③に比べて電流値が約 1/10 の Case①（電流比③/①が約 10）や 1/3 程度の Case②（③/②が約 3）が、ピーク以降では FP ガンマ線の影響により電流値の減少が少なく、時間約 0.2 秒で Case③とほぼ同じ電流値になっている（図 2-4 参照）。FP ガンマ線の影響が無ければ、Case①及び②は Case③に比例した電流変化を示す（電流比が一定となる）はずである。従って、3 つのケースの電流値が一致した時間約 0.2 秒の時点では、Case①の電流値のうち約 90%、Case②では約 70%が FP ガンマ線に起因する電流であるといえる。Case③では、鉛遮蔽体の厚さを Case②の 2 倍の 100mm としているが、Case③においても、ある程度の FP ガンマ線の影響を受けている可能性があるものと考えられる。

図 2-4、2-5 に示した測定値を出力に換算した結果を、熱中性子検出により出力測定を行っている本体系の測定結果とともに図 2-7、2-8 に示す。出力への換算は、Case①～③で測定した出力パルスの積分値と本体系で測定した出力パルスの積分値が一致するように換算定数を求めることにより行った。なお、このときパルス終了時をどの時間にするかで、厳密には積分値が変化するが、パルス終了時の出力レベルが小さいため、この終了時の時間の決め方による積分値への影響は無視できる。これらの図より、熱中性子検出による本体系では、中性子飛行時間による検出の時間遅れが顕著であり、フィルター付きのケースに比べて、出力パルス形状が大きく歪んでいることがわかる。一方、フィルター付検出器の測定結果同士を比べてみると、パルス部では 3 ケースとも良く一致しているが、パルス終了後の出力では、大きな違いが現れている。特に、Cd 被覆のみの Case①では、他に比べて出力が最大 1 衡程度大きくなっている。Case③では本体系とほぼ同レベルの出力まで低下して

おり、FP ガンマ線の影響は、本体系と同等程度に小さいということがわかる。しかしながら、本体系でも FP ガンマ線の影響を受けている可能性があり、ここに示した測定結果から Case③による測定が FP ガンマ線の影響を無視できる程度に排除していることが明らかになったとはいえない。

2.3 出力振動について

図 2-7 における本体系の測定結果では、パルス終了後の出力に小さな振動が観察されているが、フィルター付検出器ではいずれの場合も振動は現れていない。この差異について検討するために、本体系と同じ条件、つまりフィルター無しの状態の検出器（裸の検出器）を用いた測定を行った。なお、この測定は、検出器を炉心タンク上部（タンク底面より約 5m 上）に設置して行った。

結果を図 2-9、2-10 に示す。同図には、フィルターとして内側より順に、200mm 厚鉛、20mm 厚ポリエチレン、1mm 厚 Cd を設置した検出器（Case④）の測定結果及び裸の検出器を 200mm 厚の鉛で遮蔽した場合（Case⑤）の測定結果も示してある。Case④のフィルターは、Cd を最外周に設置し熱中性子を吸収することにより、ポリエチレン及び鉛の熱中性子捕獲反応によるガンマ線の影響を低減させること¹²⁾と鉛厚さの増加による FP ガンマ線の影響低減を目的としている。しかしながら、図 2-9、2-10 と図 2-7、2-8 を比較することにより明らかなように、Case⑤と Case③の測定結果はほぼ同一であった。

図 2-10 に示すパルス部の出力変化をみると、Case④以外の 2 ケースは本体系とほぼ同じ挙動を示している。しかし、図 2-9 に示されているように、パルス終了後では本体系のみが振動していることが分かる。このことより、パルス後の出力振動の有無はフィルターが原因ではないことがわかる。また、図 2-11、2-12 には電流値での測定結果の比較を示す。裸の検出器に対する鉛遮蔽体の影響はこれらの図からは顕著ではないが、電流値を線形プロットに変換した図 2-13 をみると、鉛遮蔽体により電流値が、パルスのピーク近傍から立下りにかけて 10~20%程度減少していることがわかる。この減少分は一見すると小さいが、図 2-12 に示した Case④の（熱外中性子による）電流値にとっては、無視し得ない大きさである。このことは、鉛遮蔽により減少した電流値を Case④の電流値に加えてみるとわかる。その結果を、図 2-14 に示してあるが、鉛によるガンマ線遮蔽が無い場合には、FP ガンマ線の影響が無視できないことが明らかである。

なお、ここで示した結果も 2 回の TRACY 実験において各々測定した結果をまとめたものである。各実験では出来るだけ条件が同一になるようしているが、燃料条件のわずかな変化等により完全に同じ実験を再現することは出来ない。このため、図 2-13 に示した電流値の差もそれぞれの実験条件の違いを反映している可能性があることに注意する必要がある。（ここでは、2 回の TRACY 実験において本体系で測定した出力ピーク値の変化が 1%以内に収まっていることから、同図の電流値の差は有意なものと判断した。）

2.4 まとめ

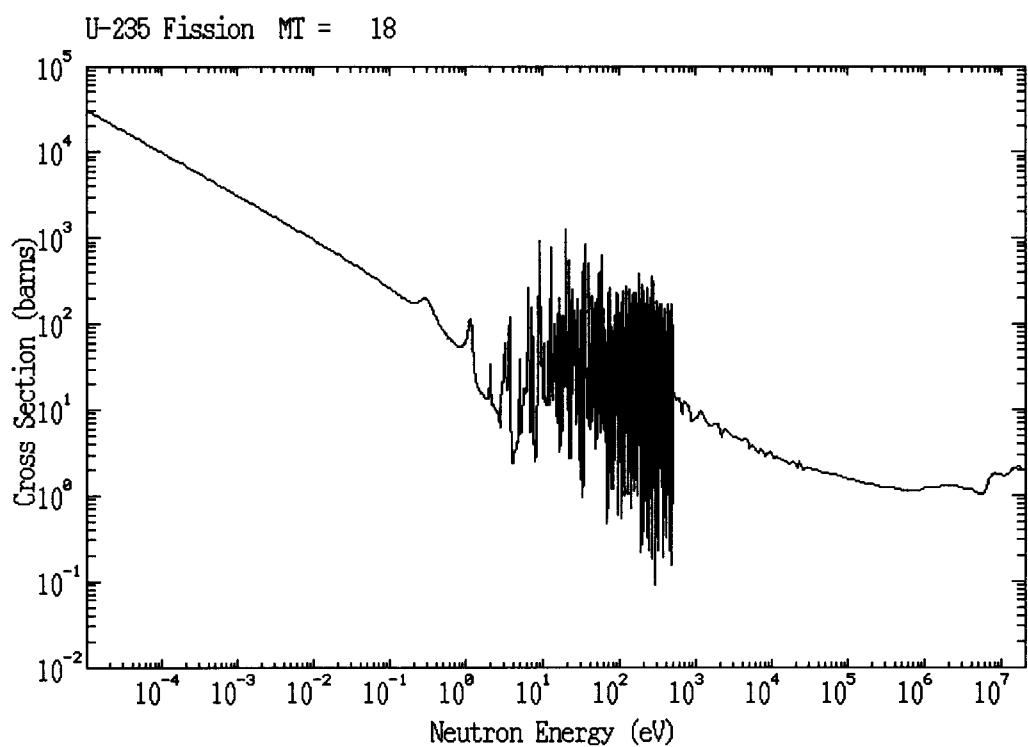
熱外中性子検出による出力パルス測定を行うために、種々のフィルターの効果について測定を実施した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- 热中性子検出を行う従来の測定手法では、炉心から検出器までの熱中性子飛行による検出の時間遅れが無視できない (Case①～③と本体系(Bare)の比較)。
- 热外中性子検出のために Cd で被覆した検出器による測定では、時間遅れの影響を低減することは出来たが、中性子検出効率が低下したことにより FP ガンマ線の効果が相対的に大きくなり、測定に無視し得ない影響を与える (Case①と Case②及び③の比較)。
- 鉛によるガンマ線の遮蔽及び Cd 被覆内に設置したポリエチレンの熱外中性子減速効果による中性子検出効率の増大は、上記の FP ガンマ線影響の低減に有効である (Case①と Case②及び③の比較)。
- 鉛の遮蔽効果は、厚さ 100mm 以上ではほとんど変化していない、また、鉛の熱中性子捕獲によるガンマ線の影響も無視できる (Case③と④の比較)。

上記の結果より、熱中性子飛行時間による時間遅れの影響を低減し、精度良い出力変化を測定するための熱外中性子測定用フィルターとしては、Cd 被覆下に適切な厚さの減速材を設置し、さらに厚さ 100mm 以上の鉛（相当）でガンマ線を遮蔽する性能を有しているものが適していることがわかった。今回実施した測定の範囲では、Case③あるいは④のフィルターが該当している。但し、中性子減速材であるポリエチレンの厚さについては、系統的な評価を行っていないため、最適なフィルター設計のためには今後の実験あるいは解析評価が必要である。また、ガンマ線遮蔽体に関しては、鉛厚さが 100mm と 200mm では有意な差が認められなかったが、この遮蔽条件においても 2.2 節で述べたように、ガンマ線の有意な影響が残っている可能性が高い。これに関しては、ガンマ線遮蔽効果を効率的に高める方法を検討するとともに、中性子検出効率を上げる工夫が必要である。

表 2-1 使用したフィルター一覧

Case	フィルターの構成	記号
①	検出器を 0.5mm 厚の Cd で被覆。	Cd(0.5)
②	検出器を 10mm 厚ポリエチレンで囲い、その外側を 1mm 厚 Cd で被覆、最外周に 50mm 厚鉛を設置。	P(10)+Cd(1)+Pb(50)
③	Case②において、ポリエチレン厚さを 20mm、鉛厚さを 100mm に変更。	P(20)+Cd(1)+Pb(100)
④	検出器を 200mm 厚鉛で囲い、その外側に 20mm 厚ポリエチレンを設置、最外周を 1mm 厚 Cd で被覆。	Pb(200)+P(20)+Cd(1)
⑤	検出器を 200mm 厚の鉛で遮蔽。	Pb(200)

図 2-1 ^{235}U の核分裂断面積 (JENDL-3.2 ライブライ¹¹⁾)

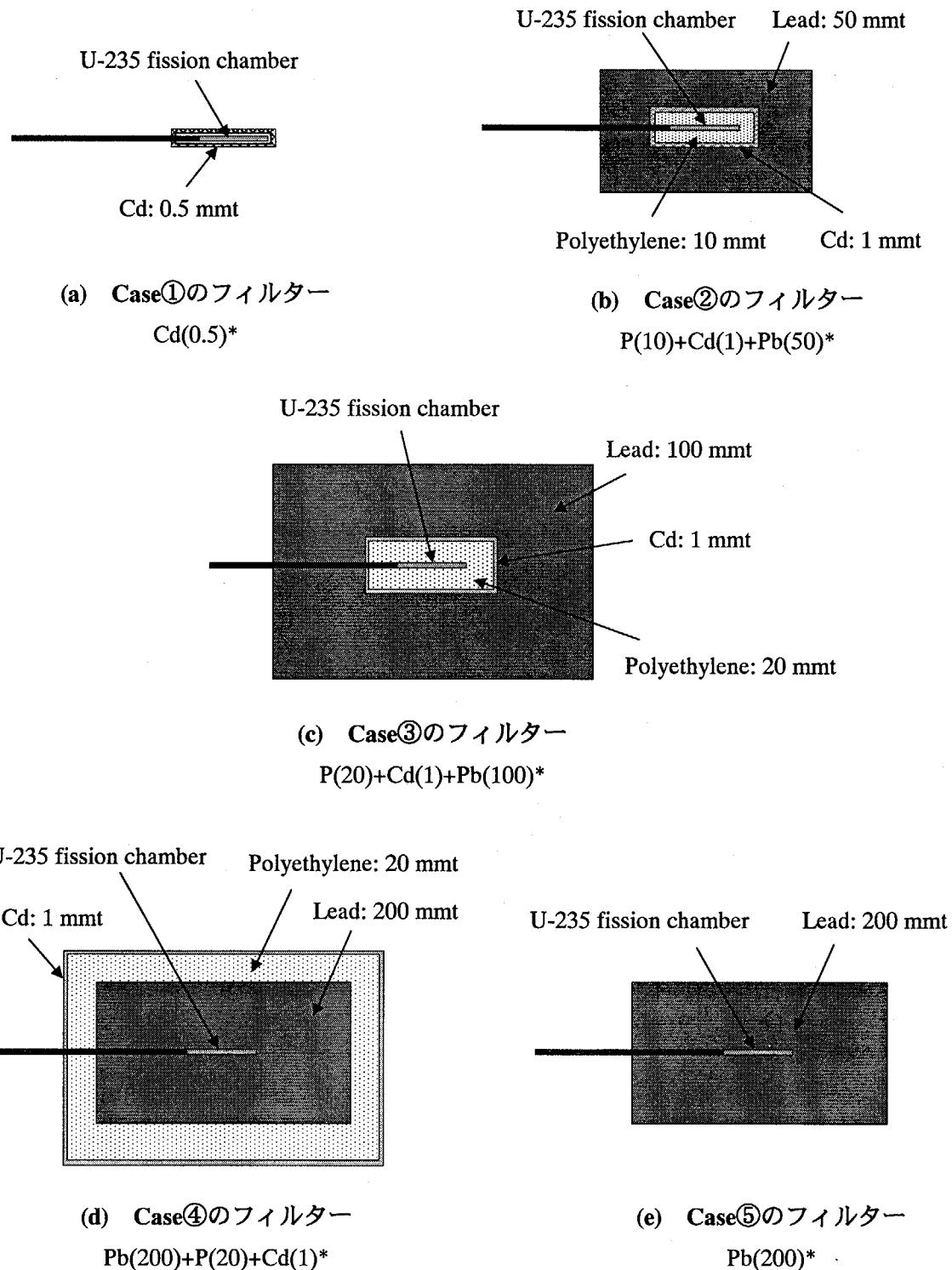


図 2-2 热外中性子検出用フィルターの概略構造

*) P : ポリエチレン、Pb : 鉛、Cd : カドミウムを表す。
カッコ内の数値は mm 単位の厚さを示す。

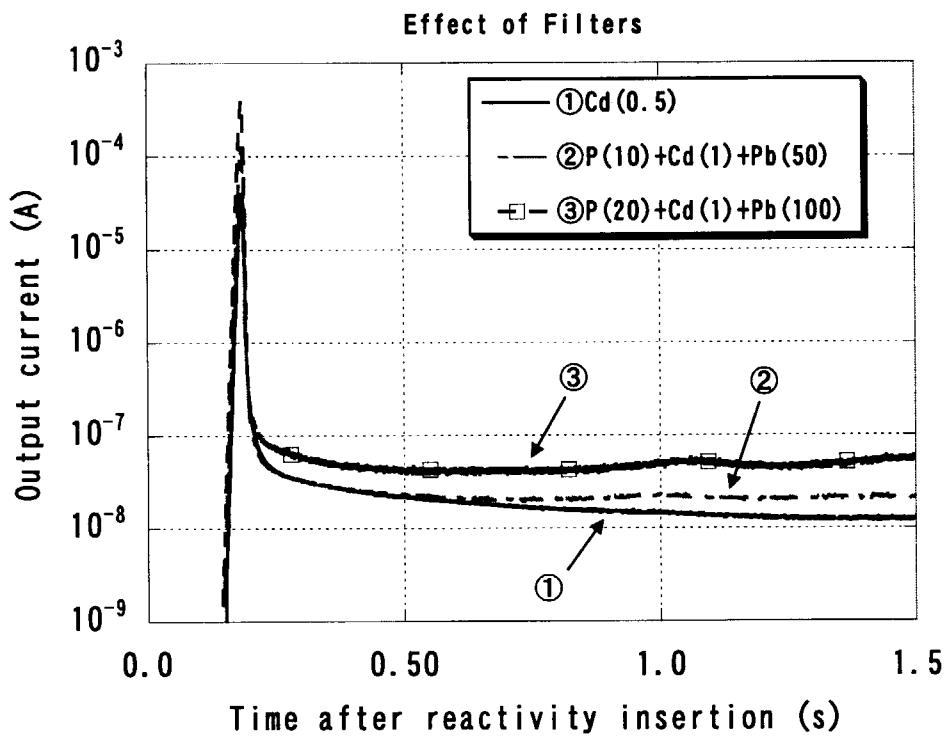


図 2-3 フィルター効果の測定結果（電流値）(1)

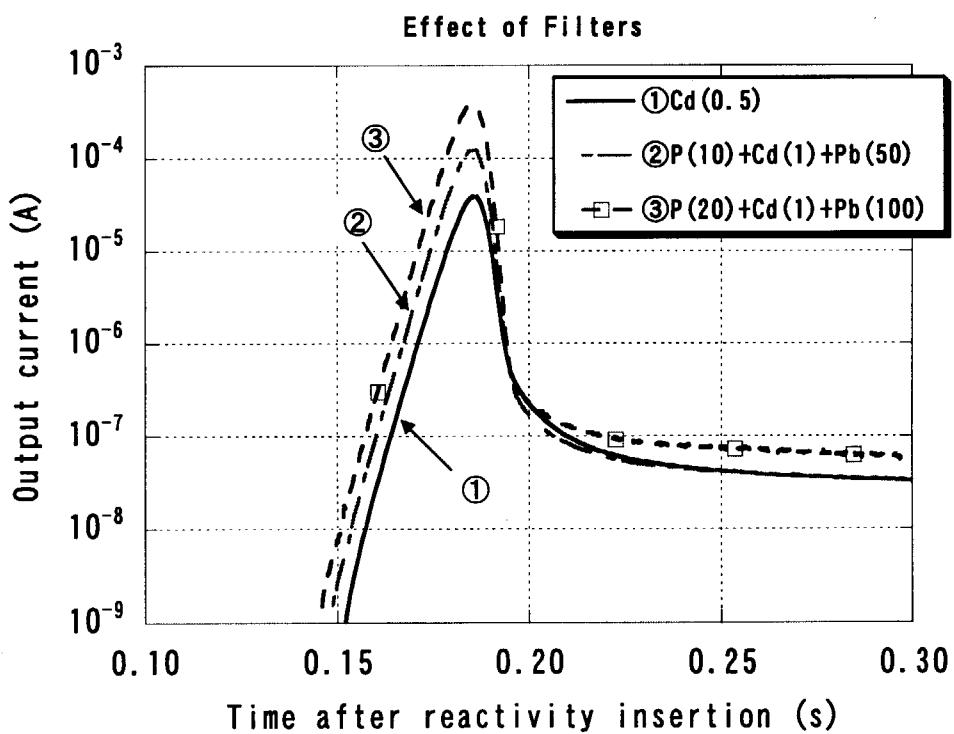


図 2-4 フィルター効果の測定結果（電流値）(2)

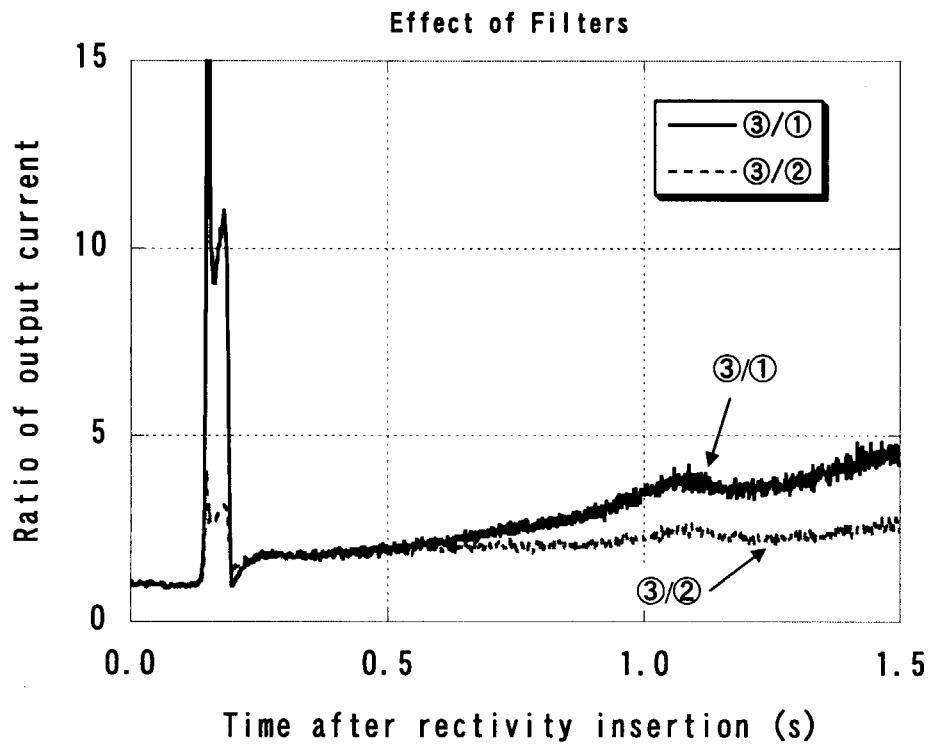


図 2-5 電流値の比の時間変化 (1)

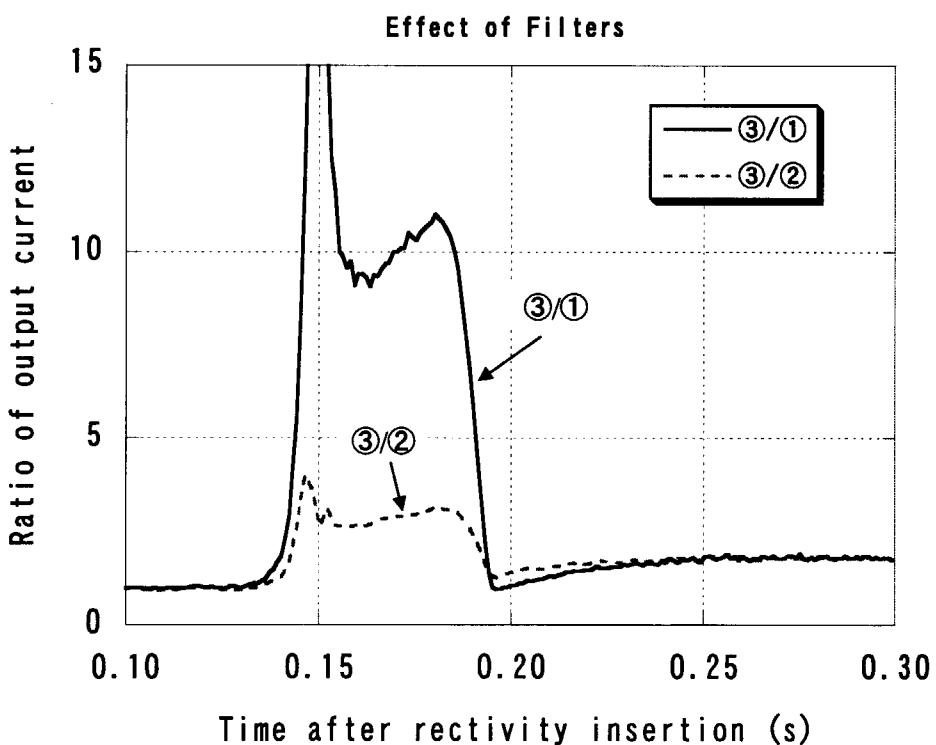


図 2-6 電流値の比の時間変化 (2)

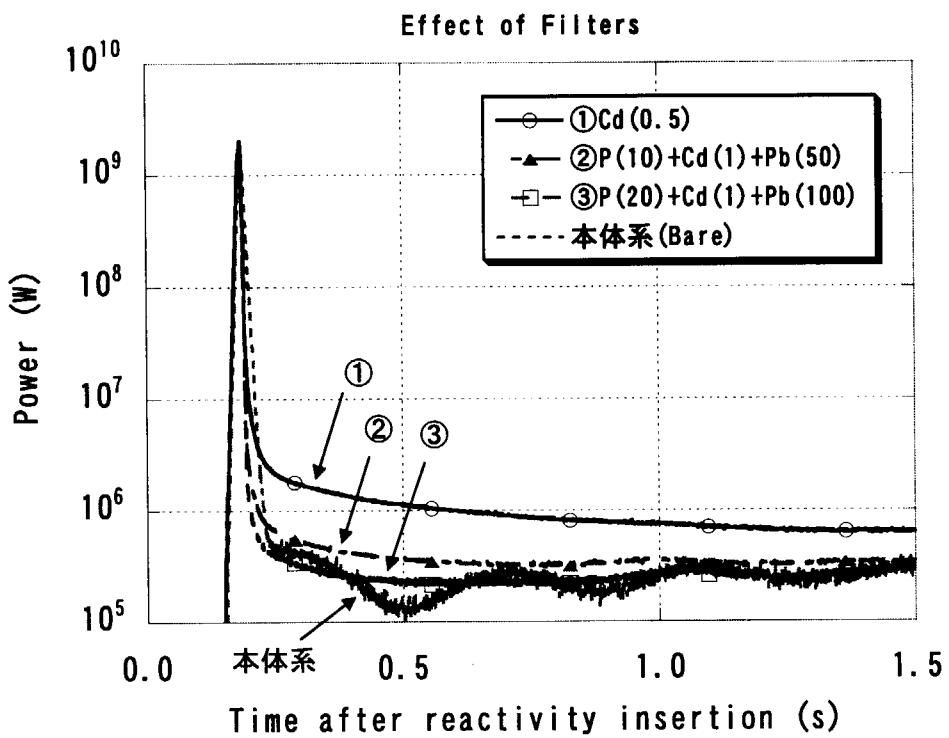


図 2-7 フィルター効果の測定結果（出力換算）(1)

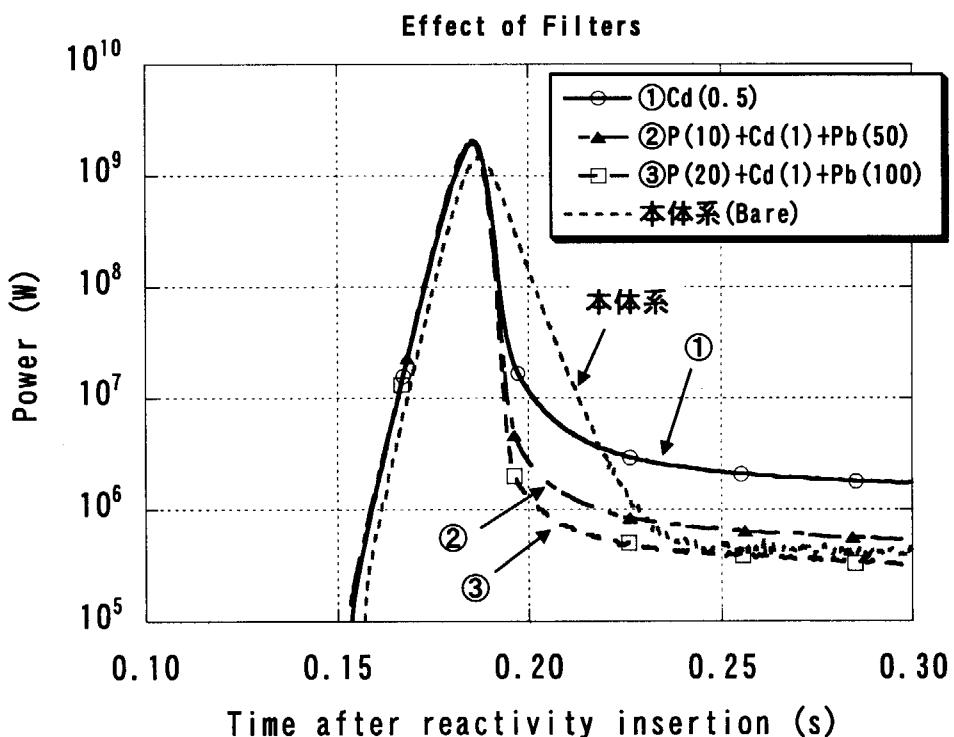


図 2-8 フィルター効果の測定結果（出力換算）(2)

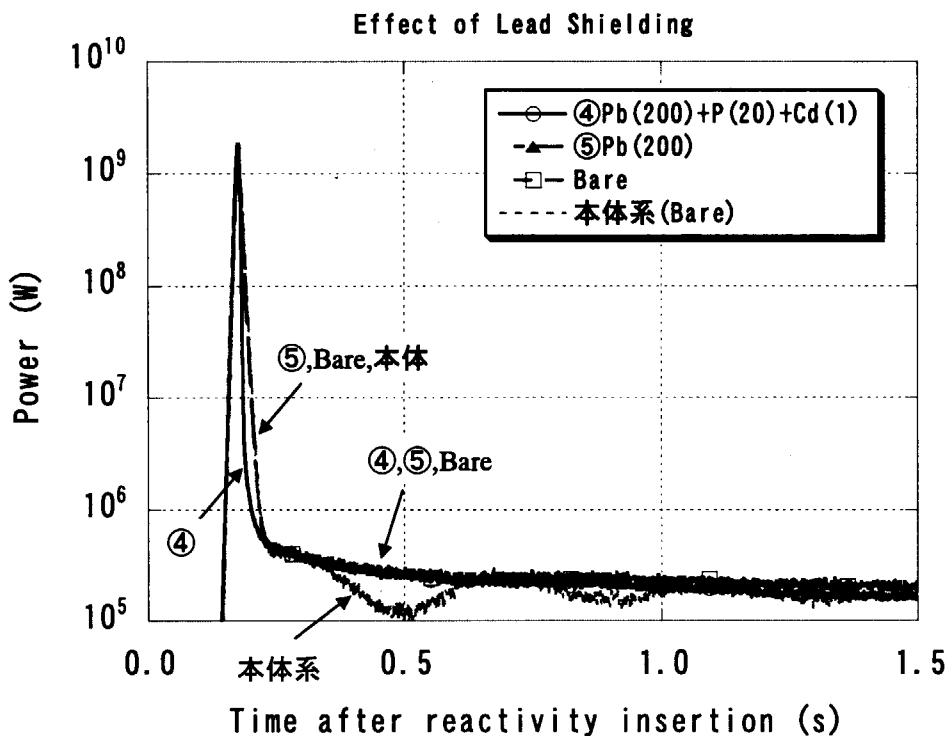


図 2-9 鉛遮蔽体の効果（出力換算）(1)

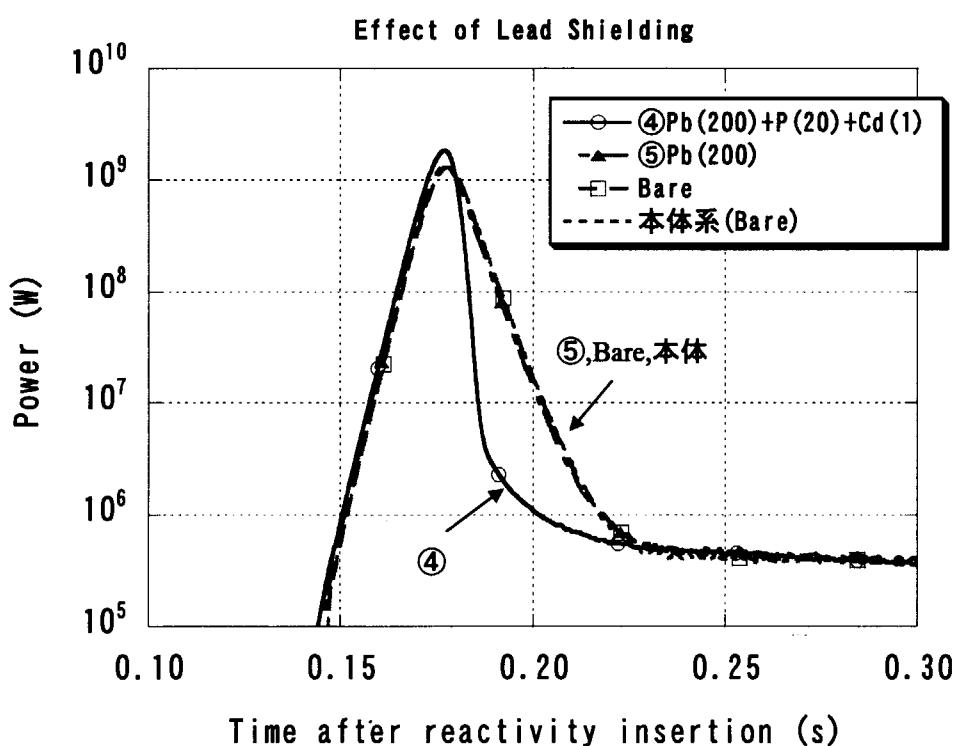


図 2-10 鉛遮蔽体の効果（出力換算）(2)

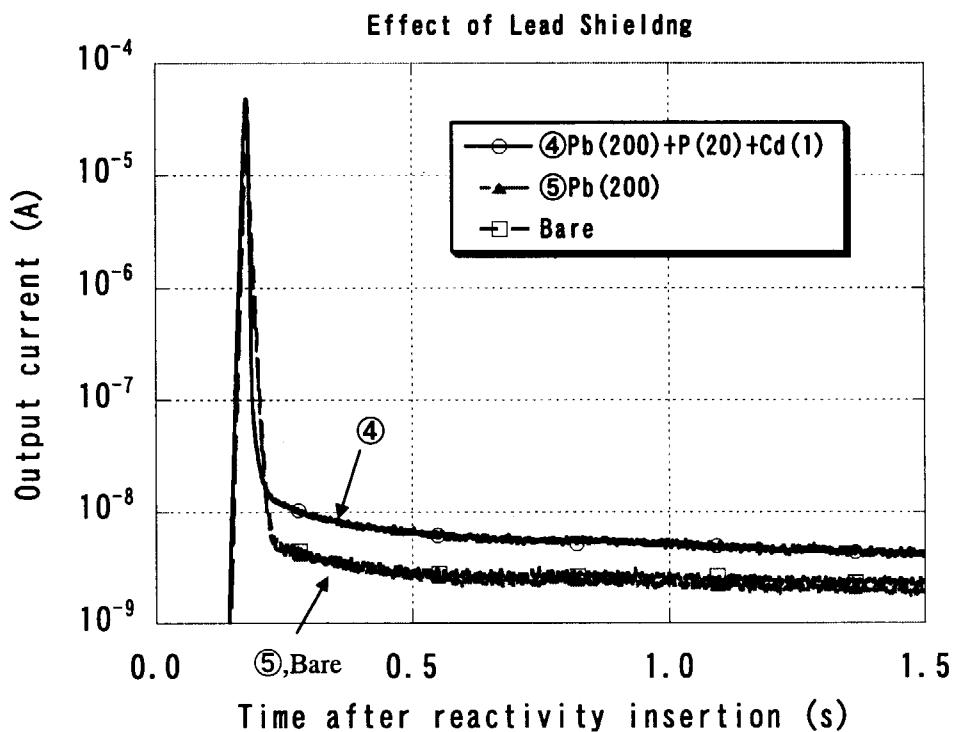


図 2-11 鉛遮蔽体の効果（電流値）(1)

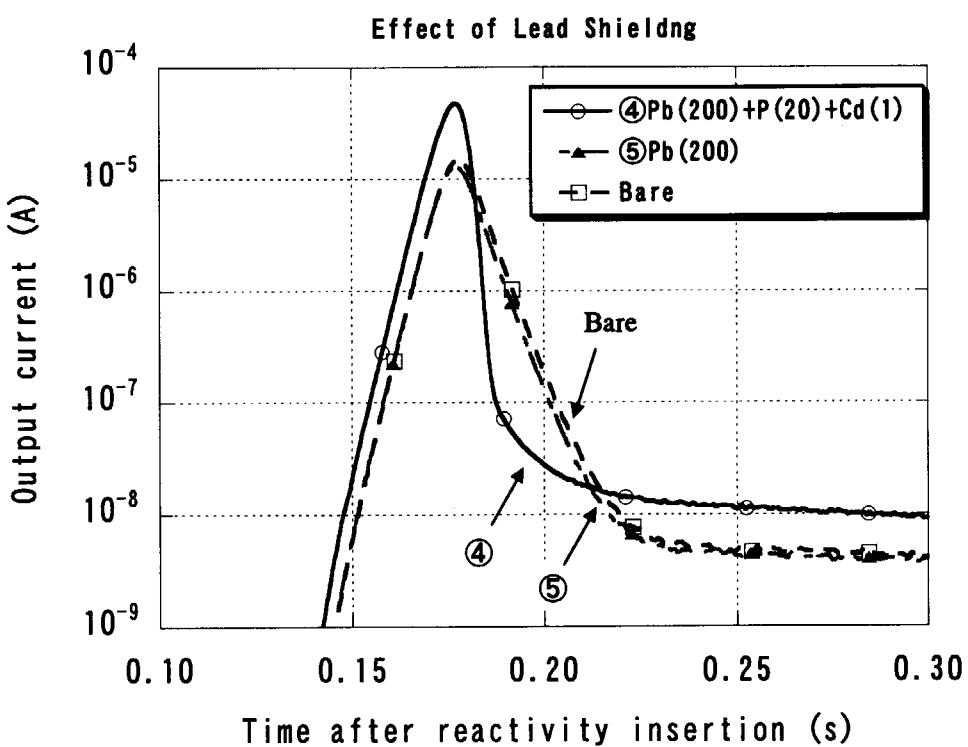


図 2-12 鉛遮蔽体の効果（電流値）(2)

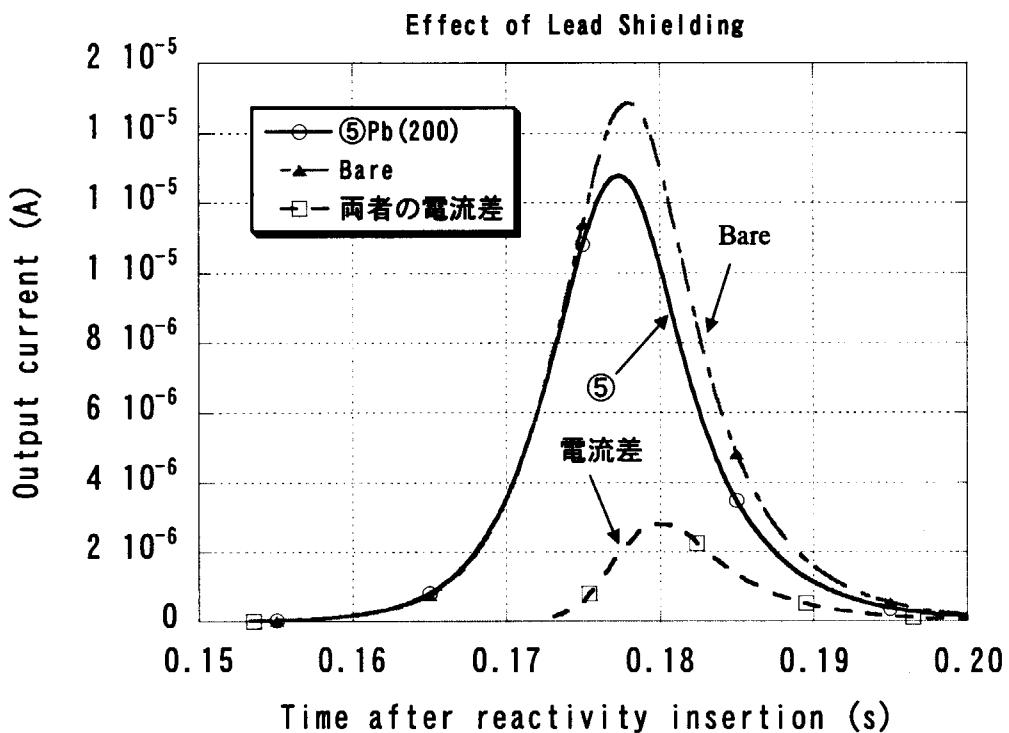


図 2-13 鉛遮蔽体の効果（電流値：線形プロット）

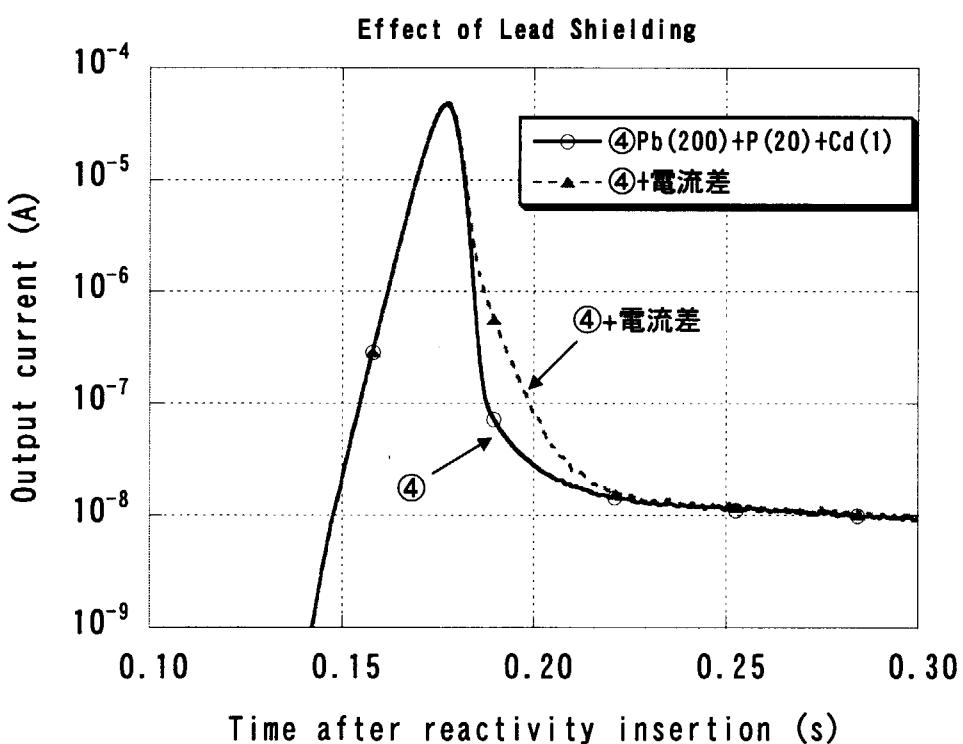


図 2-14 ガンマ線による出力パルス歪みの評価

3. 热外中性子検出による出力履歴の測定結果

3.1 概要

第2章で特性を確認したフィルター（Case③）を用いて、一連の出力変化パルスの測定を行った。測定を行った実験では、1.5\$～3\$の反応度をステップ状に添加するパルス引抜モードによる運転を行った。表3-1に対象とした実験の条件一覧を示す。燃料溶液のウラン濃度は約390gU/liter、臨界液位は約510mmでほぼ一定である。使用したフィルターは第2章に述べたCase③であり、検出器（ ^{235}U 核分裂電離箱）を20mm厚ポリエチレンで囲い、その外側を1mm厚Cdで被覆、さらに最外周を100mm厚の鉛で覆っている。この検出器を炉心タンクから水平方向に約2.5m離れた位置に設置した。

3.2 測定結果

以下に、表3-1の各実験における出力パルスの測定結果として、上述のフィルターを用いて行った熱外中性子検出による測定と本体系による熱中性子検出による測定結果の比較を示す。なお、熱外中性子検出による出力データの校正では、第2章で述べたのと同様に、パルス部の積分値が熱中性子検出の場合と一致するようにした。また結果には、参考として燃料溶液部の圧力の測定結果も併せて示してある。

(1) 反応度 1.50\$

図3-1及び3-2に、添加反応度1.50\$の場合の出力パルスの測定結果を示す。熱外中性子検出に比べて熱中性子検出では、パルスの立ち上がりがわずかに遅れており、時間遅れの影響を受けていることがわかる。両者の違いはパルスの立下りで大きくなり、図3-2に示すように熱中性子検出では出力が歪んでいることがわかる。パルス終了後の出力変化では、両者ともに小さな出力振動が現れており、比較的良好い一致をしている。また、この出力振動と燃料溶液の圧力振動が同期していることから、溶液で生じた物理的な振動が出力振動を引き起こす原因になっているものと考えられる。燃料溶液の圧力振動の原因としては、パルス部で溶液内に発生した放射線分解ガスの体積変化が考えられている。

表3-2には、ピーク出力の測定結果の比較を示す。熱外中性子及び熱中性子検出による出力ピーク値の差は約4%であり、熱中性子検出による時間遅れの出力ピーク値への影響は小さいことがわかる。

(2) 反応度 1.80\$

図3-3及び3-4に、添加反応度1.80\$の場合の出力パルスの測定結果を示す。1.50\$の場合と同様に、パルス立ち上がりの時間遅れ、立下りの出力歪みが熱中性子検出において現れている。特に、立下り時の歪みが1.50\$の場合よりも大きくなっている。また、パルス終了

後の出力振動の様子を比べると、終了直後の小さな出力ピークは両者とも観察されているが、それ以降は2つの出力測定結果は異なった挙動を示している。一方、溶液部圧力はパルス終了直後の小さな出力ピークと同時刻にピークが現れている。しかし、その後の圧力振動は、熱外中性子検出による出力データに同期した小さな振動が観察されているが、熱中性子検出では圧力振動とは無関係な振動が現れていることがわかる。

出力ピーク値については、表3-2に示したように、熱外中性子検出の場合が約8%大きくなっている、添加反応度とともに熱中性子検出の結果との差が大きくなっていることがわかる。

(3) 反応度 2.00\$、2.40\$、2.97\$

図3-5~3-10に、添加反応度2.00\$、2.40\$、2.97\$の場合の出力パルスの測定結果を示す。パルスの立ち上がり、立下り部における熱中性子検出と熱外中性子検出の差は、上述の2ケースとほぼ同じである。また、パルス終了後の出力変化でも、上記(2)と同様の違いが現れている。反応度2.00\$~2.97\$の場合には、パルス終了以後には圧力の顕著な振動は観察されておらず、熱中性子検出による出力振動とは、2.00\$の場合のパルス終了直後のピーク以外では、はっきりとした相関は見られない。

出力ピーク値における両者の差は、表3-2に示すように添加反応度とともに大きくなっている、反応度2.97\$の場合には、熱外中性子検出の結果は熱中性子検出の約1.4倍となっている。

(4) ガンマ線検出による出力測定結果との比較

上述の熱外中性子検出による出力測定結果と、ガンマ線検出による測定結果⁹⁾との比較を行った。図3-11には、熱中性子検出により求めた出力ピーク値に対するガンマ線及び熱外中性子検出による出力ピーク値の比を示す。同図より、熱中性子検出による出力ピーク値の過小評価が安定逆炉周期の増加とともに、ほぼ直線的に大きくなっていることがわかる。また、ガンマ線検出と熱外中性子検出の2つの測定結果の差は最大5%と出力測定誤差(約10%)の範囲内であり、両者は良い一致をしている。

3.3 まとめ

添加反応度1.50~2.97\$のステップ状添加の超臨界実験における出力パルスの測定を熱中性子及び熱外中性子検出により実施した。両測定結果の比較により、熱中性子検出による測定では、飛行時間による検出の遅れが無視できないことがわかった。この影響は、添加反応度とともに増大し、ピーク出力で比較すると、反応度1.50\$の場合には両者の差が約4%であったのに対し、最大反応度である2.97\$の場合には、出力ピーク値が約40%異なっていた。この測定結果は、別途行われたガンマ線検出による測定結果と良い一致を示した。

また、出力パルス後の出力変化でも両測定結果に差が見られたが、溶液部圧力の変化と比較した場合、熱外中性子検出による出力の方が、圧力の振動状態に一致した振動を示していることがわかった。

以上より、高速出力パルスの測定においては、熱外中性子検出による測定手法が有効であることが示された。また、出力パルス以降の挙動についても適切な結果を与えていているといえる。

表 3-1 実験条件一覧

Run	U濃度 (gU/liter)	硝酸濃度 (N)	溶液温度 (°C)	臨界液位 (mm)	設定液位*	反応度 (\$)
204	391.0	0.56	25.6	506.05	551.41	1.50
197	386.8	0.60	25.7	514.18	574.14	1.80
196	385.5	0.58	25.6	511.66	582.50	2.00
195	385.5	0.58	26.2	517.17	604.13	2.40
203	388.2	0.58	25.7	512.17	623.76	2.97

* 超臨界実験時の初期液位

表 3-2 ピーク出力測定結果

Run	反応度 (\$)	安定 逆炉周期 (s ⁻¹)	ピーク出力及び到達時間				ピーク 出力比	
			熱中性子測定		熱外中性子測定			
			出力(W)	時間(s)	出力(W)	時間(s)		
204	1.50	86.5	1.46E+08	0.469	1.52E+08	0.465	1.04	
197	1.80	137.0	3.44E+08	0.380	3.72E+08	0.377	1.08	
196	2.00	169.4	4.93E+08	0.346	5.66E+08	0.344	1.15	
195	2.40	234.3	8.43E+08	0.271	1.09E+09	0.269	1.29	
203	2.97	333.5	1.44E+09	0.187	2.08E+09	0.185	1.45	

注) 1.46E+08 は、 1.46×10^8 と読む。

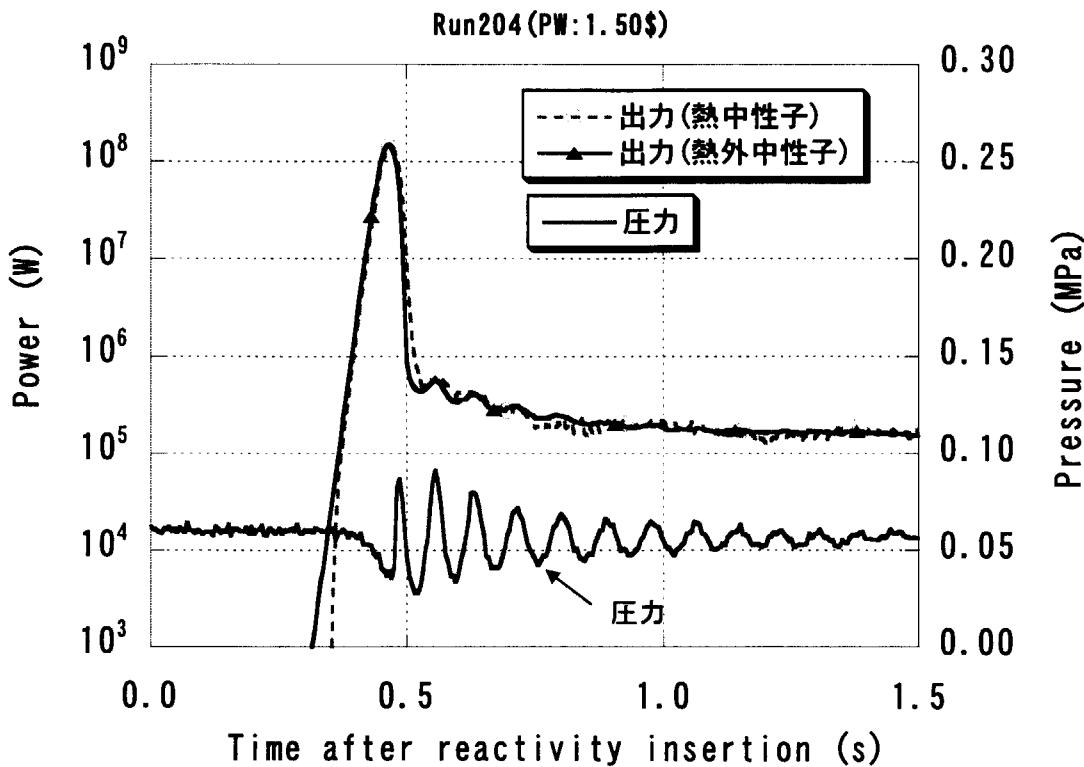


図 3-1 出力及び圧力の時間変化

(パルス引抜 : 1.50\$)

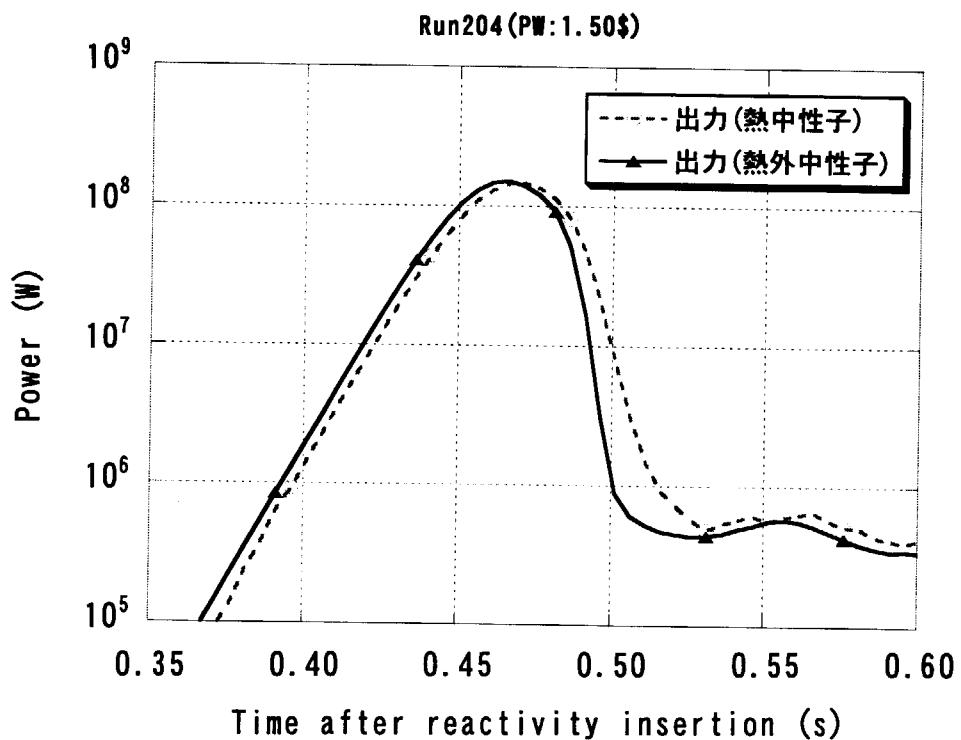


図 3-2 熱中性子及び熱外中性子検出による出力の比較

(パルス引抜 : 1.50\$)

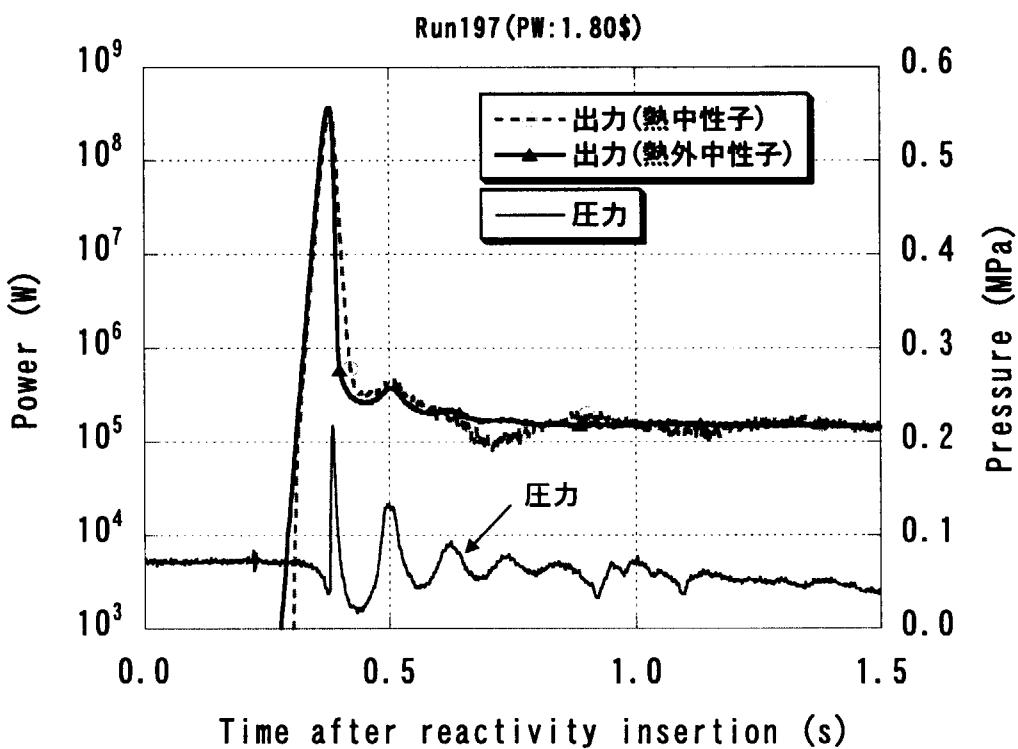


図 3-3 出力及び圧力の時間変化

(パルス引抜 : 1.80\$)

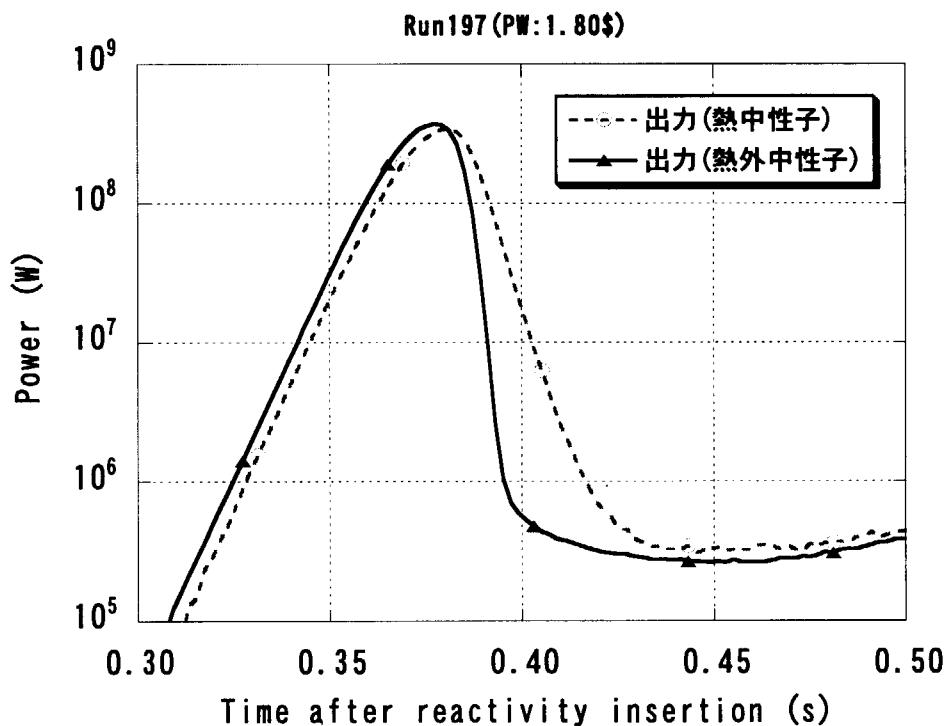


図 3-4 热中性子及び热外中性子検出による出力の比較

(パルス引抜 : 1.80\$)

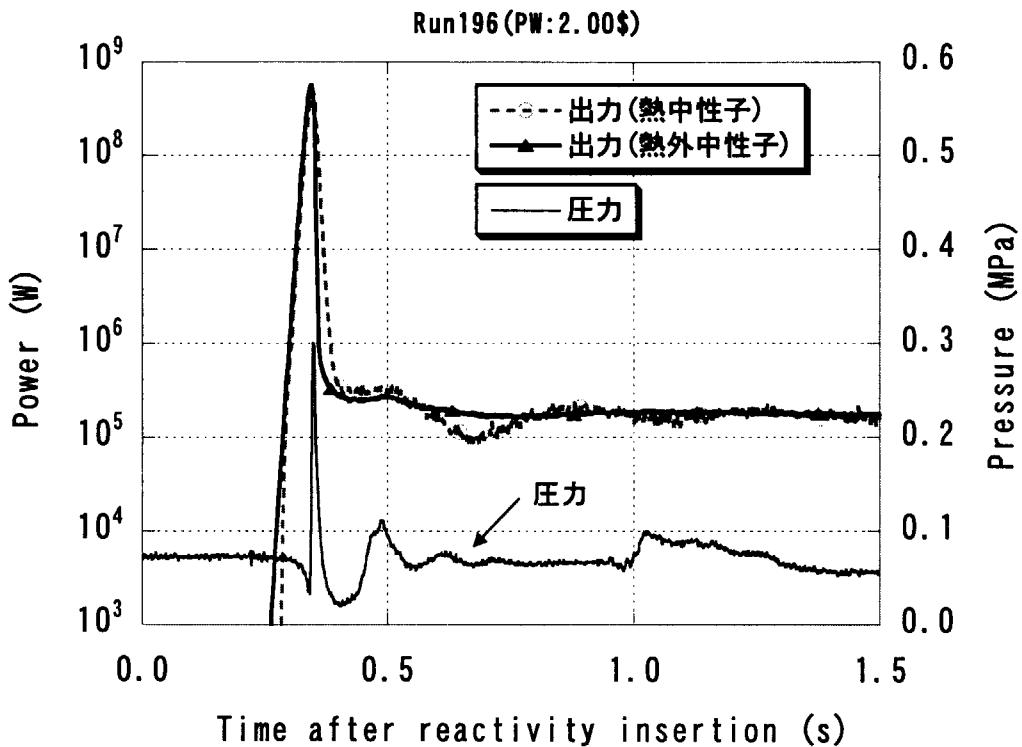


図 3-5 出力及び圧力の時間変化

(パルス引抜 : 2.00\$)

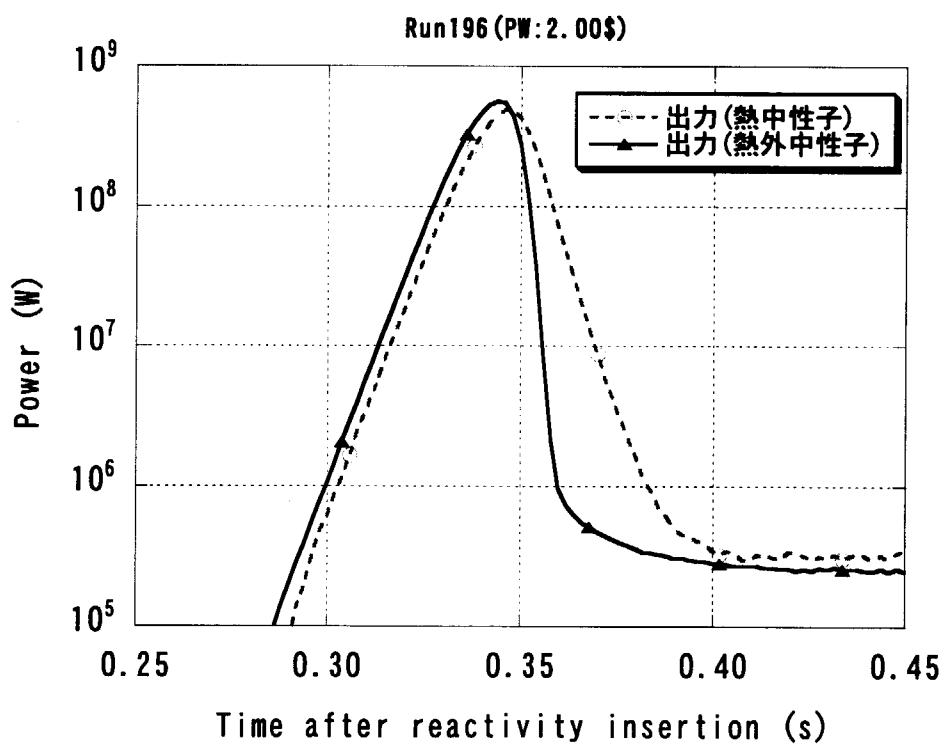


図 3-6 热中性子及び热外中性子検出による出力の比較

(パルス引抜 : 2.00\$)

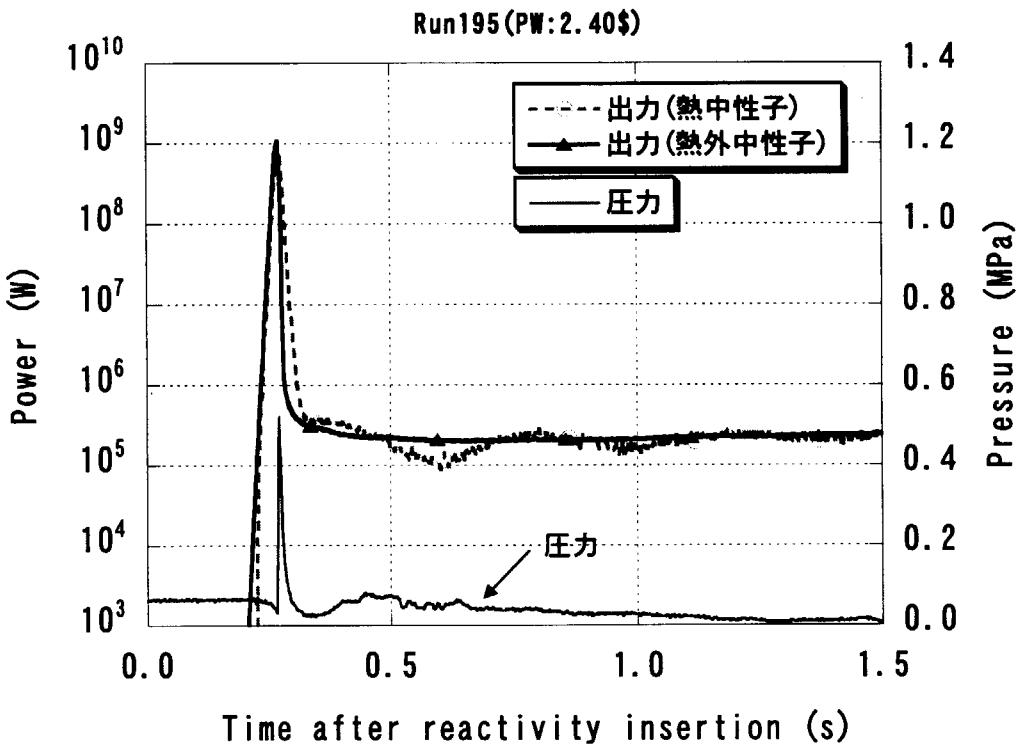


図 3-7 出力及び圧力の時間変化

(パルス引抜 : 2.40\$)

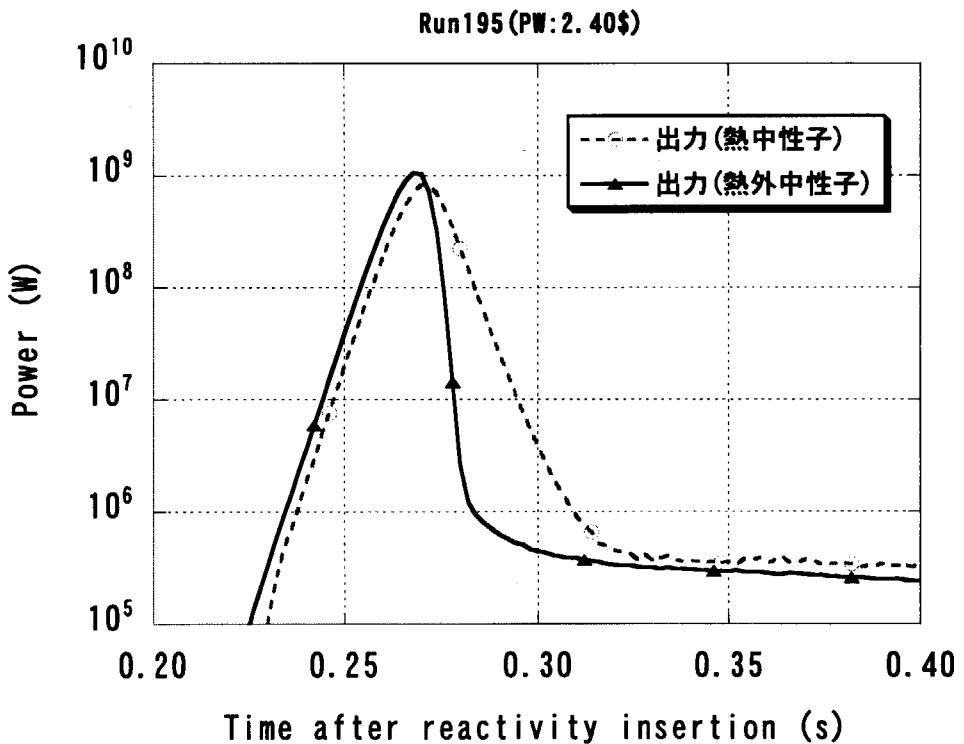


図 3-8 热中性子及び热外中性子検出による出力の比較

(パルス引抜 : 2.40\$)

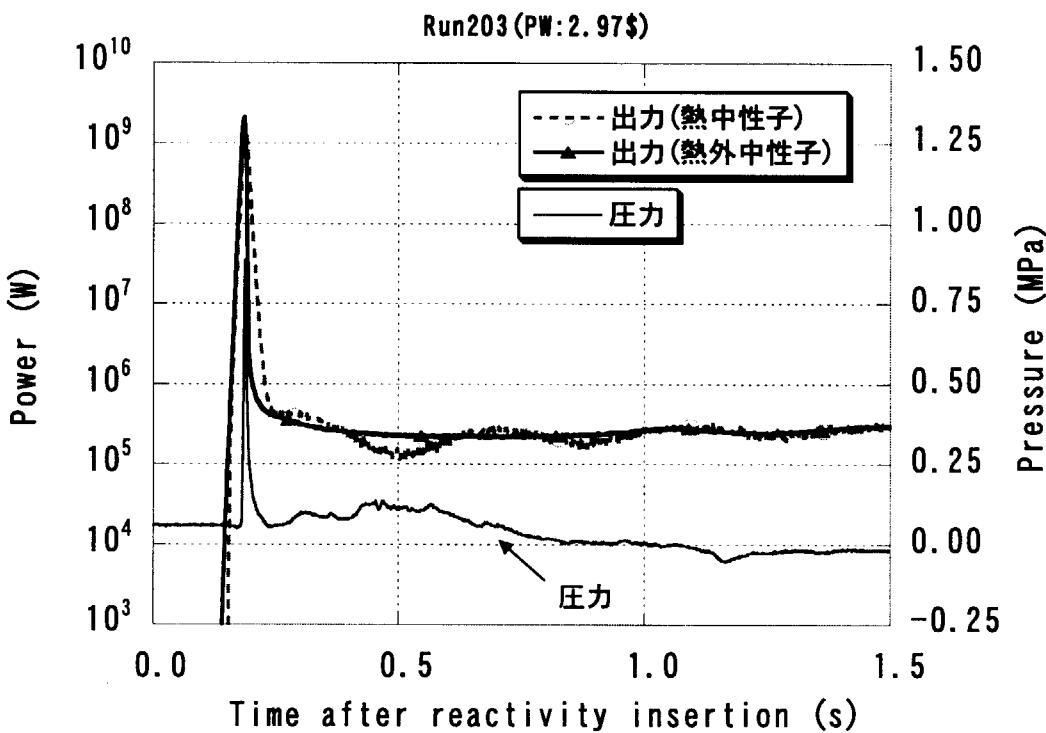


図 3-9 出力及び圧力の時間変化

(パルス引抜 : 2.97\$)

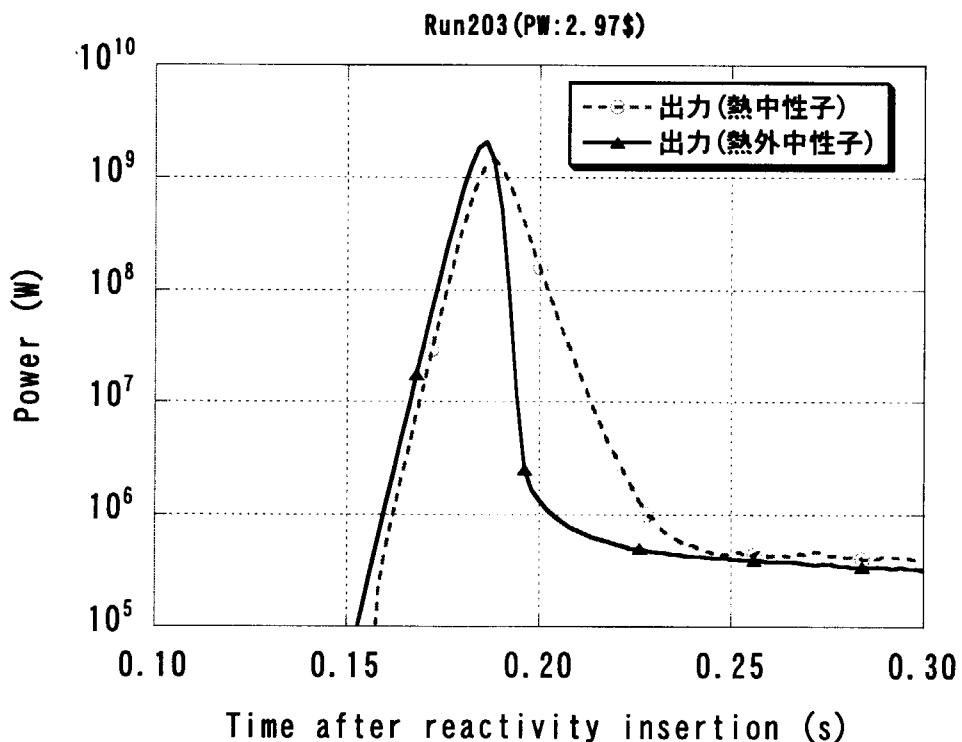


図 3-10 热中性子及び热外中性子検出による出力の比較

(パルス引抜 : 2.97\$)

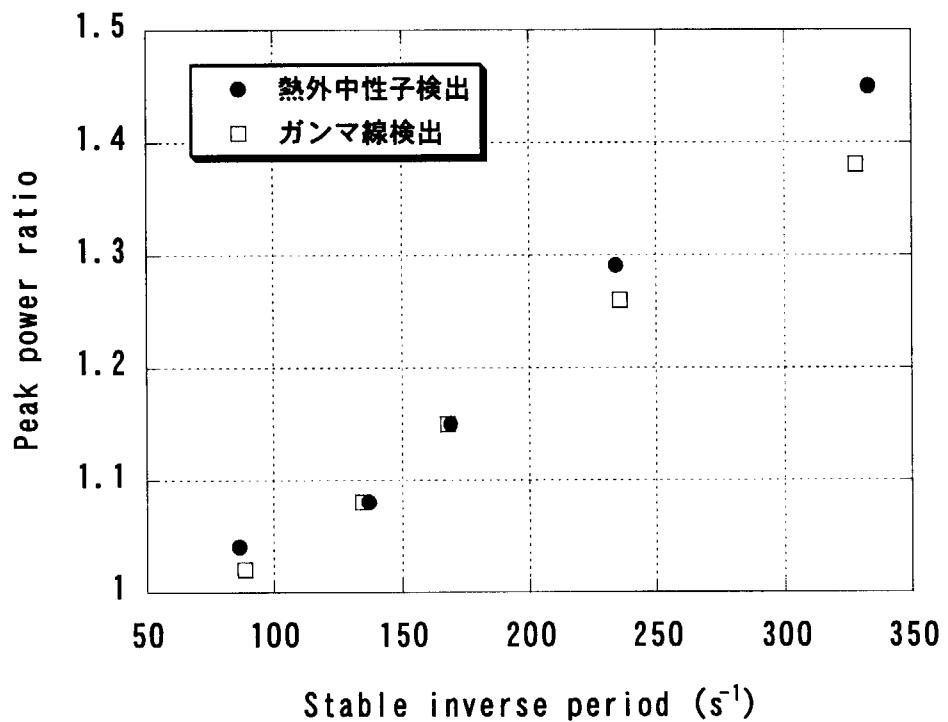


図 3-11 热中性子検出によるピーク出力に対する热外中性子検出及び
ガンマ線検出によるピーク出力の比

4. まとめ

TRACY を用いた超臨界実験において、高速出力パルスを精度良く測定するために、熱外中性子検出による出力測定を試みた。

熱外中性子の測定のために、カドミウム (Cd) 被覆の ^{235}U 核分裂電離箱を使用し、中性子検出効率を向上させるための中性子減速材としてポリエチレンを Cd 被覆内に設置した。また、ガンマ線によるノイズの影響を低減するために鉛遮蔽体を設けた。これらの、Cd、ポリエチレン、鉛を組み合わせたフィルターの効果を測定し、ポリエチレンによる中性子検出効率の増倍効果、鉛による FP ガンマ線の遮蔽効果を確認した。

熱中性子検出により出力測定を行っている本体系検出器との測定結果の比較では、熱中性子検出による時間遅れの影響により出力に歪みを生じ、また、出力ピーク値が減少することが明らかになった。出力ピーク値の変化は、ステップ状の反応度添加量が 1.5\$ の場合には約 4% であり、測定誤差と同等程度であるが、反応度が約 3\$ になると、40%以上と大きな影響を与えることがわかった。なお、TRACY では調整トランジエント棒を一定速度で引抜く「ランプ引抜」モードと調整トランジエント棒を使用せずに連続給液で反応度を添加する「ランプ給液」モードでの運転が可能であるが、これらランプ状反応度添加の実験における出力変化の速さ（炉周期）は、最大でも 1.5\$ のステップ状添加程度であり、出力測定における時間遅れの影響は小さいといえる。

本測定において、出力パルス収束後に熱中性子検出と熱外中性子検出の出力挙動の違いが観察されたが、この原因については明らかではない。また、鉛遮蔽体による FP ガンマ線の低減が認められたが、測定結果への影響を無視できる程度までガンマ線を低減しているかは、確認できていない。今後、これらの課題を解明するための実験的研究が必要である。

参考文献

- 1) T. P. McLaughlin *et al.*, *A Review of Criticality Accidents, 2000 Revision*, LA-13638, Los Alamos National Laboratory (2000).
- 2) H. Yanagisawa, K. Nakajima, K. Ogawa *et al.*, "Experiments on Transient Behavior of a Low-Enriched Uranyl Nitrate Solution System with TRACY to Study Hypothetical Criticality Accidents in Reprocessing Plants," *Proc. Sixth Int. Conf. on Nuclear Criticality Safety*, September, Versailles, France, p.900 (1999).
- 3) 會澤栄寿, 小川和彦, 櫻庭耕一 他, 「TRACY の運転記録」, JAERI-Tech 2002-031, 日本原子力研究所 (2002).

- 4) K. Nakajima, Y Yamane, K. Ogawa *et al.*, *TRACY Transient Experiment Databook, 1) Pulse Withdrawal Experiment*, JAERI-Data/Code 2002-005, Japan Atomic Energy Research Institute (2002).
- 5) K. Nakajima, Y Yamane, K. Ogawa *et al.*, *TRACY Transient Experiment Databook, 2) Ramp Withdrawal Experiment*, JAERI-Data/Code 2002-006, Japan Atomic Energy Research Institute (2002).
- 6) K. Nakajima, Y Yamane, K. Ogawa *et al.*, *TRACY Transient Experiment Databook, 3) Ramp Feed Experiment*, JAERI-Data/Code 2002-007, Japan Atomic Energy Research Institute (2002).
- 7) H. Yanagisawa, A. Ohno, K. Ogawa *et al.*, “Time Delay of thermal Neutron Detection during Power Burst in TRACY,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **38**[8], 591 (2001).
- 8) H. Yanagisawa and A. Ohno, “Evaluation of Power History during Power Burst Experiments in TRACY by Combination of Gamma-Ray and Thermal Neutron Detectors,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**[6], 597 (2002).
- 9) 柳澤宏司, 「溶液燃料体系の反応度投入出力バースト実験における出力履歴及び光子照射線量率の評価に関する研究」, 名古屋大学大学院工学研究科博士論文, 2002 年 7 月 (2002).
- 10) H. Yanagisawa, A. Ohno and E. Aizawa, “Determination of Gamma-Ray Exposure Rate from Short-Lived Fission Products under Criticality Accident Conditions,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**[5], 499 (2002).
- 11) T. Nakagawa, K. Shibata, S. Chiba *et al.*, “Japanese Evaluated Nuclear Data Library Version 3 Revision-2: JENDL-3.2,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **32**[12], 1259 (1995).
- 12) H. Yanagisawa, K. Nakajima, A. Ohno *et al.*, “Evaluation of Photon Shielding Capability for Epithermal Neutron Detection during Reactivity-Initiated Power Burst Experiments,” *J. Nucl. Sci. Technol.*, **39**[7], 800 (2002).

付録 1 : TRACY の概要

TRACY は、直径 50cm の円筒形炉心タンクに、 ^{235}U 濃縮度 10% の硝酸ウラニル水溶液を給液することにより実験を行う。炉心タンクの中心には、直径約 7cm の貫通孔があり、その内部を調整トランジエント棒（制御棒）が移動する。炉心タンクには 3 本の安全棒の他に、温度計、液位計、圧力計が取り付けられている。また、タンク周囲には核計装（起動系、運転系、安全出力系、過渡系）が設置されている。

超臨界実験を開始するための反応度添加は、①溶液燃料を一定の給液速度（最大 65 ℓ/min）で炉心タンクに給液する（ランプ給液）方法、②調整トランジエント棒を電動駆動により一定の速度（最大 900cm/min）で炉心から引抜く（ランプ引抜き）方法、③調整トランジエント棒を圧縮空気駆動により瞬時（約 0.2 秒）に炉心から引抜く（パルス引抜き）方法の 3 つとおりで行う。反応度の添加量は最大 3 \$、また実験 1 回あたりの積分出力は 9 kWh（核分裂数 10^{18} ）までに制限されている。実験での反応度添加は、小さな量から行い、制限値を越えないことを確認しながら、段階的に添加量を増加させていく。

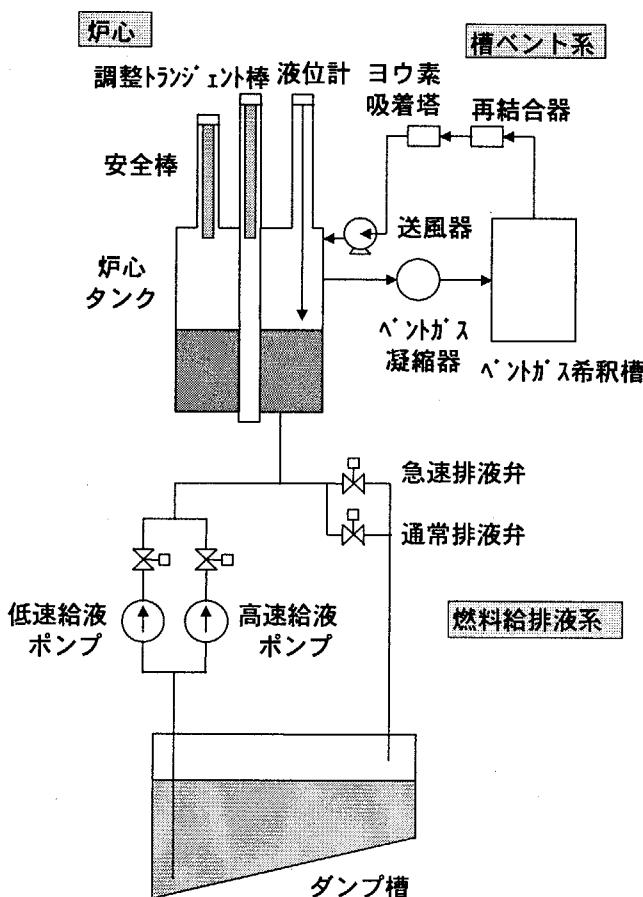


図 A-1 TRACY 主要系統図

うになっている。

実験では、超臨界時の出力（中性子束）、温度、圧力等の時間変化を測定し、反応度フィードバック等のメカニズムを明らかにする。このための計測系として、核計装、温度計、圧力計が取り付けられている。核計装としては、起動系、運転系線形出力系、運転系対数出力系が炉心タンク周囲に各2系統設置されている。また、安全出力系、過渡線形出力系が各2系統、過渡対数出力系が1系統、炉室天井に設置されている。このほかに実験目的に応じて、実験用核計装が設置される。温度計は、運転監視用として炉心タンク下部底面に熱電対が1系統設置されているほか、実験系として10系統の熱電対が炉内温度分布測定のために取り付けられている。圧力計としては、炉心タンク下部側面に歪みゲージ式圧力計が1系統設置されている。これらの計測データは、すべて、データロガーによりデジタルデータとして記録されている。

放射性物質の放出、移行、沈着等に関するデータを取得するために、炉心タンクベントガスライン及び炉心タンクには、ベントガスサンプリング設備が設置されている。同設備により、ベントガス中のエアロゾル濃度、エアロゾル粒子径分布、ヨウ素濃度、水素及びNO_xガス濃度等の測定を行う。

付録 2：実験一覧

本研究において実施した超臨界実験の条件一覧を表 A-1 及び A-2 に示す。表中の備考には、参考として本文中に述べた実験データを示す「ケース番号」あるいは「公称添加反応度」を記してある。

表 A-1 実験条件一覧（第 2 章：フィルター効果の測定に関する実験）

Run	U濃度 (gU/liter)	硝酸濃度 (N)	溶液密度 (g/cm ³)	溶液温度 (°C)	臨界液位		設定液位 (mm)	添加 反応度 (\$)	備考 (Case番号)
					Tr棒上限 (mm)	Tr棒下限 (mm)			
192	384.9	0.54	1.53348	25.8	508.06	619.44	619.36	2.93	Case①
194	385.6	0.51	1.53422	26.4	507.92	619.16	619.16	2.93	Case②
203	388.2	0.58	1.53693	25.7	509.62	623.76	623.76	2.97	Case③ 本体系(Bare)
219	395.5	0.57	1.54909	25.6	489.83	587.78	587.77	2.89	Case④
220	396.0	0.60	1.54947	25.4	488.95	586.46	586.46	2.89	Case⑤
221	395.9	0.63	1.54989	25.5	488.74	586.17	586.17	2.89	Bare

表 A-2 実験一覧（第 3 章：出力履歴の測定に関する実験）

Run	U濃度 (gU/liter)	硝酸濃度 (N)	溶液密度 (g/cm ³)	溶液温度 (°C)	臨界液位		設定液位 (mm)	添加 反応度 (\$)	備考 (公称反応度)
					Tr棒上限 (mm)	Tr棒下限 (mm)			
204	391.0	0.56	1.54150	25.5	502.81	611.72	551.41	1.50	1.50\$
197	386.8	0.60	1.53732	25.6	511.43	627.00	574.14	1.80	1.80\$
196	385.5	0.58	1.53481	25.6	511.66	627.39	582.50	2.00	2.00\$
195	385.5	0.58	1.53481	26.2	517.17	638.65	604.13	2.40	2.40\$
203	388.2	0.58	1.53693	25.7	509.62	623.76	623.76	2.97	2.97\$

付録 3：熱外中性子検出系の測定条件

熱外中性子検出のために使用した核分裂電離箱は、ウェスチングハウス製の炉内モニター用検出器であり、93%濃縮ウランを使用した外径約4mmのペンシル型電離箱である。この電離箱の出力電流は、制御室内に設置された高速前置増幅器にて電圧に変換された後、高速対数増幅器により増幅される。なお、回路内に電流が流れ始める際の時間遅れを少なくするために、バイアス電流として 10^{-10}A を印加している。表 A-3 に検出器の仕様を、また、図 A-2 に測定回路構成を示す。図 A-3 及び A-4 には、本報告書に記載した全ての実験における熱外中性子用検出器の配置を示す。(Run 番号と実験との対応については、付録 2 を参照のこと。)

表 A-3 核分裂電離箱の仕様

項目		仕様
型式		WL-23621 (Westing House 製)
形状・寸法		円筒形、外径 3.8mm × 長さ 76.2mm (有感長 25.4mm)
材質	本体・電極	ステンレス鋼
	絶縁体	Al_2O_3
	中性子有感材	U_3O_8 (^{235}U 濃縮度 93%)、U 重量約 0.9mg
	封入ガス	アルゴン
電気特性		静電容量 20nF、絶縁抵抗 $10^5\Omega$ 以上
最大定格	印加電圧	250 V
	熱中性子束	10^{14} nv
	ガンマ線量率	$1.7 \times 10^9 \text{ R/hr}$
	寿命	$2.8 \times 10^{20} \text{ nvt}$
動作定格	印加電圧	50~150 V
	測定範囲	$\sim 10^{14} \text{ nv}$
	熱中性子感度	10^{-17} A/nv
	ガンマ線感度	$1.5 \times 10^{-14} \text{ A/R/hr}$

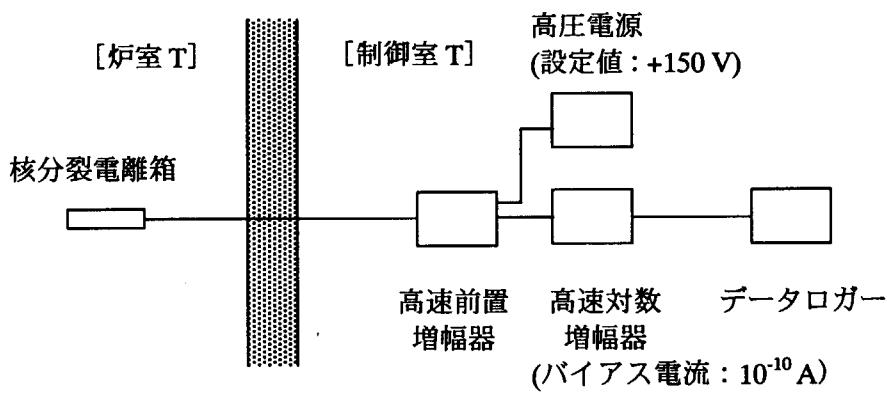


図 A-2 測定回路構成

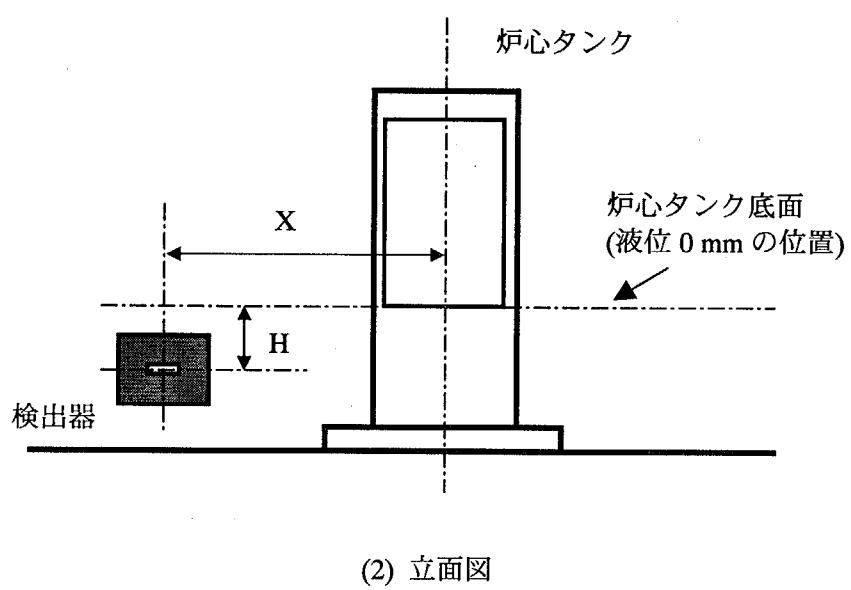
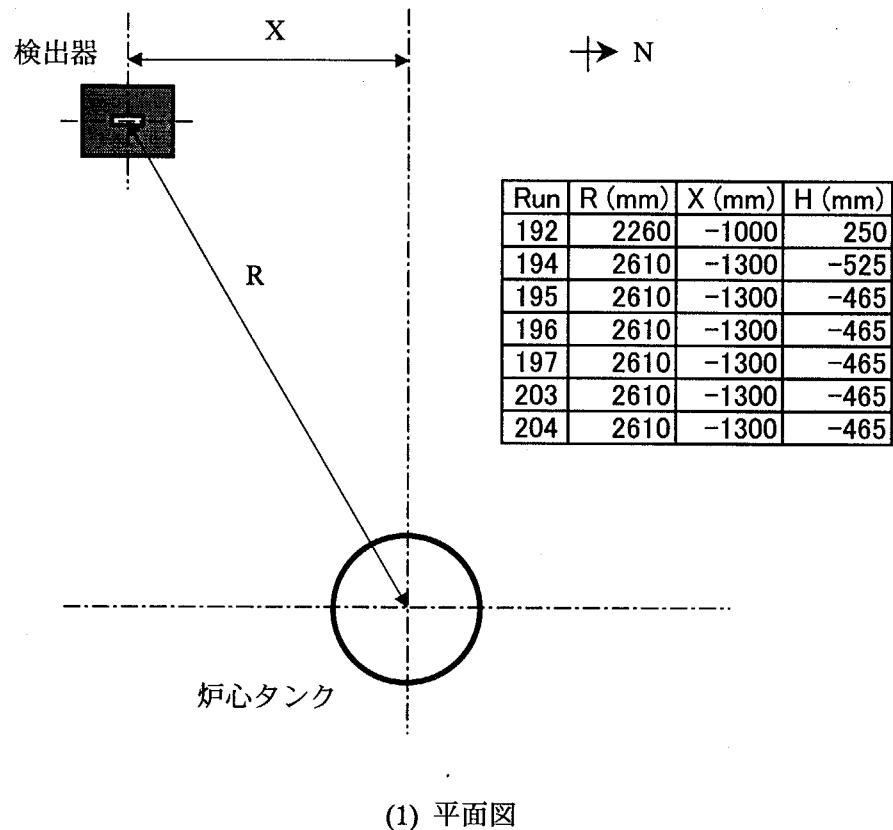
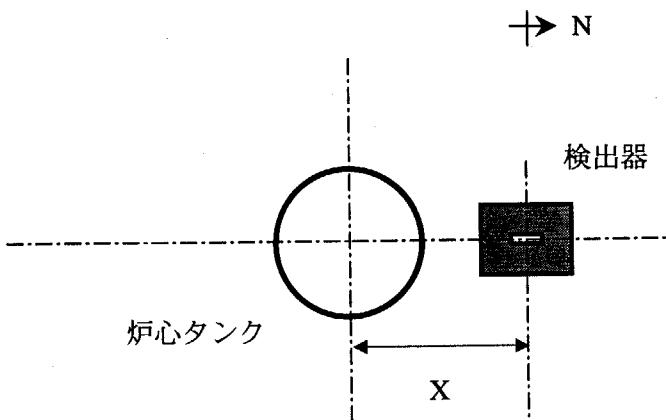
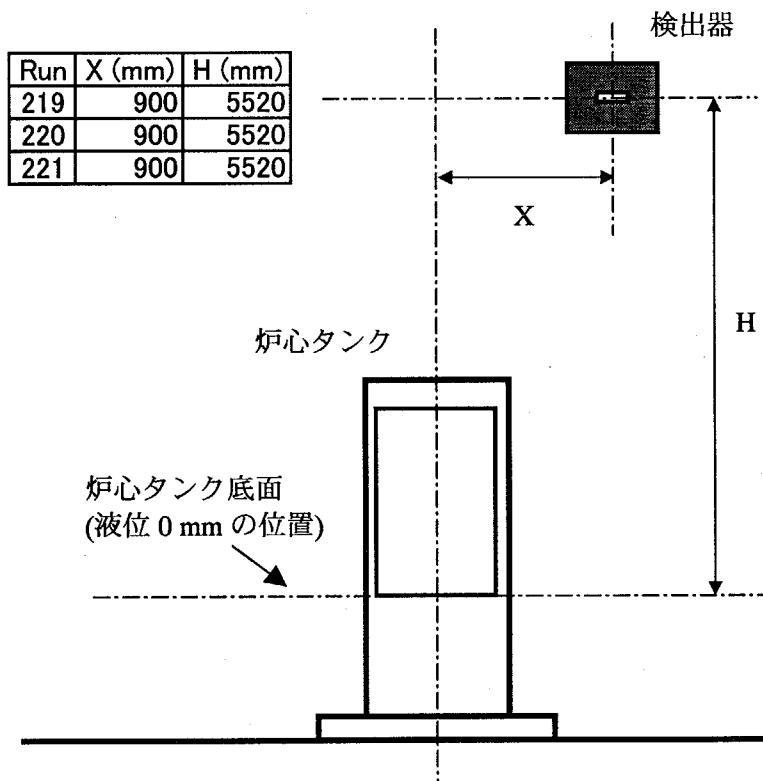


図 A-3 热外中性子测定用検出器の配置（1）

Run192, 194, 195, 196, 197, 203, 204 における配置



(1) 平面図



(2) 立面図

図 A-4 热外中性子测定用検出器の配置（2）
Run 219, 220, 221 における配置

This is a blank page.

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
功率、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	ファラード	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	°C	
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
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

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

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

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

(注)

- 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 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。
- 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。
- 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 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	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 cal = 4.18605 J(計量法)	
								1	= 4.184 J(熱化学)
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 ²⁶			
4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)		
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s		
1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W		
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			

放射能	Bq	Ci	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	Sv	rem
	3.7 × 10 ¹⁰	1	0.01	1	2.58 × 10 ⁻⁴	1	1	0.01	1	1

(86年12月26日現在)

熱外中性子検出によるTRACAY超臨界実験の出力履歴の測定

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。