

JAERI-Tech
2003-029



JP0350214



STACY非均質炉心における位置検出型比例計数管
による中性子束分布の測定と解析(1)
(受託研究)

2003年3月

村崎 穰・宇野 祐一・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（〒319-1195 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, 2003

編集兼発行 日本原子力研究所

STACY 非均質炉心における位置検出型比例計数管による中性子束分布の測定と解析 (1)
(受託研究)

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
村崎 穰・宇野 祐一・三好 慶典

(2003年1月31日 受理)

未臨界度測定手法の開発のため、STACY 非均質炉心体系の実験において、位置検出型比例計数管 (PSPC) により、炉心タンク外側近傍における中性子束分布の測定を行った。測定の結果、硝酸ウラニル溶液のウラン濃度 50g/L~210g/L の範囲における臨界時及び未臨界時の中性子束分布を±13mm の位置精度で得た。また、パルス中性子実験における測定により、即発中性子減衰定数 α を求めた。さらに、連続エネルギーモンテカルロコード MCNP により、PSPC 測定位置における中性子束分布及び ^3He 反応率分布を求め、PSPC 測定値との比較を行った。比較の結果、カドミウムカバー付き PSPC の測定値に対して、計算値は、臨界液位の半分の高さより上部では概ね一致したが、それより下部では両者の差が大きくなった。一方、カドミウムカバーなしの測定値に対して、計算値は良く一致した。

Measurement and Analysis of Neutron Flux Distribution of STACY Heterogeneous Core
by Position Sensitive Proportional Counter
(Contract Research)

Minoru MURAZAKI , Yuichi UNO 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 measured neutron flux distribution around the core tank of STACY heterogeneous core by position sensitive proportional counter (PSPC) to develop the method to measure reactivity for subcritical systems. The neutron flux distribution data in the position accuracy of $\pm 13\text{mm}$ have been obtained in the range of uranium concentration of 50g/L to 210g/L both in critical and in subcritical state. The prompt neutron decay constant, α , was evaluated from the measurement data of pulsed neutron source experiments. We also calculated distribution of neutron flux and ^3He reaction rates at the location of PSPC by using continuous energy Monte Carlo code MCNP. The measurement data was compared with the calculation results. As results of comparison, calculated values agreed generally with measurement data of PSPC with Cd cover in the region above half of solution height, but the difference between calculated value and measurement data was large in the region below half of solution height. On the other hand, calculated value agreed well with measurement data of PSPC without Cd cover.

Keywords: Position Sensitive Proportional Counter, STACY, MCNP, Neutron Flux Distribution, Subcriticality

This report includes the result of research conducted under the contract with the Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology of JAPAN.

目次

1. はじめに.....	1
2. PSPC と測定機器の仕様.....	2
2.1 PSPC の動作原理.....	2
2.2 PSPC 仕様.....	2
2.3 位置キャリブレーション.....	4
2.4 測定系統図.....	7
3. 測定条件及び測定結果.....	9
3.1 測定条件.....	9
3.2 中性子束分布測定結果.....	22
3.3 パルス中性子実験測定結果.....	45
4. PSPC 測定値と MCNP による計算値の比較.....	70
4.1 計算の目的.....	70
4.2 計算条件.....	70
4.3 計算結果.....	71
4.4 計算結果に対する検討.....	72
5. まとめと今後の課題.....	100
謝辞.....	100
参考文献.....	101
付録.....	102

Contents

1. Introduction.....	1
2. Specification of PSPC and Measurement Equipment	2
2.1 Principle of PSPC's Operation	2
2.2 Specification of PSPC.....	2
2.3 Position Calibration of PSPC	4
2.4 Block Diagram of Measurement Equipment	7
3. Measurement Conditions and Results	9
3.1 Measurement Conditions	9
3.2 Measurement Results of Neutron Flux Distribution.....	22
3.3 Measurement Results of Pulsed Neutron Source Experiments.....	45
4. Comparison with Measurement Results and Calculation Results by MCNP.....	70
4.1 Calculation Purpose.....	70
4.2 Condition of Calculation.....	70
4.3 Calculation Results.....	71
4.4 Discussions for Calculation Results.....	72
5. Conclusion and Future Work.....	100
Acknowledgements.....	100
References.....	101
Appendix.....	102

1. はじめに

未臨界度測定手法の開発を目的として位置検出型比例計数管 (PSPC) を用いて中性子束分布測定等の実験を行った。従来行われていた中性子束分布の測定は、 ^3He 検出器を移動させて測定を行うスキャン法が用いられていたが、PSPC の導入でスキャン法に比べて大幅に測定時間を短縮することができる。パルス中性子法を用いた未臨界実験においては、中性子の検出時刻を記録することができる簡便な測定システムが使用可能となり、中性子束分布のミリ秒単位での時間変化を測定することが可能である。これにより、即発中性子減衰定数 α の値を測定することができる。

本報告書ではロイターストークス社製 PSPC を使用して STACY600 ϕ 円筒非均質炉心におけるウラン濃度 50g/L \sim 210g/L での中性子束分布測定、及びパルス中性子実験での中性子束分布の時間変化測定についてまとめた。また、MCNP により PSPC 設置位置における中性子束分布及び ^3He 反応率分布を計算し、PSPC 測定結果との比較を行った。比較の結果、カドミウムカバー付き PSPC の測定値に対して、計算値は、臨界液位の半分の高さより上部では概ね一致したが、それより下部では両者の差が大きくなった。一方、カドミウムカバーなしの測定値に対して、計算値は良く一致した。

2. PSPC と測定機器の仕様

2.1 PSPC の動作原理

PSPC 中の位置検出を行う方法は図 2.1.1 に示した電荷分割に基づくものである。PSPC 中の陽極線は約 $5800\ \Omega$ の高い抵抗を持つように製作され、収集電荷は相互作用の位置に単純に関係した割合で陽極線の両端に取り付けられた 2 台の増幅器に分割される。2 台の増幅器の出力を加算すると、全電荷に比例した波高を持つ通常出力パルスが作られる。一方の増幅器の出力を加算信号で割算すると陽極線の長さに沿った相対的位置を示す位置信号が得られる。このとき高圧電源が接続されているほうの出力を V_a 、他方の出力を V_c とすると位置信号 Pos は下記の式(1)によって表される。

$$Pos = \frac{V_c}{V_a + V_c} \quad (2-1)$$

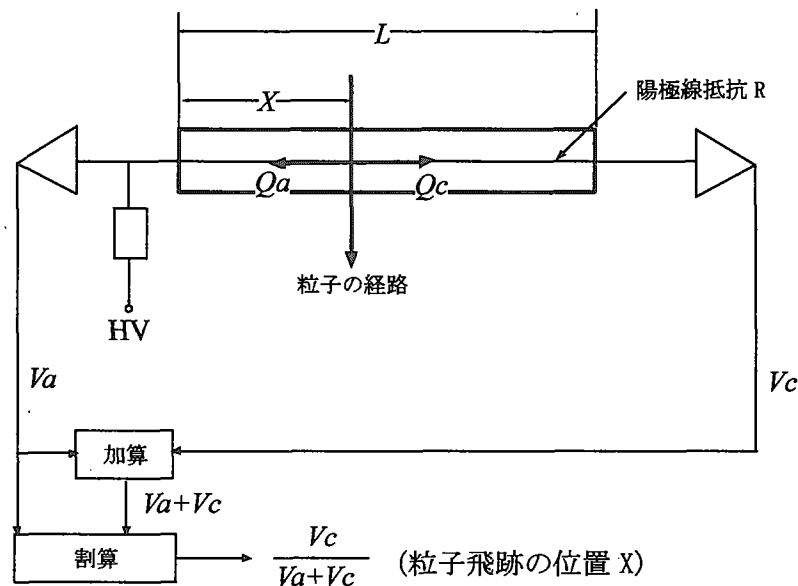


図 2.1.1 PSPC 中の位置検出法

2.2 PSPC 仕様

PSPC の外観を図 2.2.1 に、構造を図 2.2.2 に示す。PSPC は直径 25.4mm、全長 1559mm であり、そのうち有感部は 1422mm である。基本的な構造は通常の ^3He 検出器と同様であり、SUS 管の内部に芯線としてニクロム線が通っている。通常の ^3He 検出器と違うのは出力信号が両端から出力されることによって反応が起こった位置を特定できるということである。封入ガスは ^3He とし、今回 0.2 気圧と 1 気圧の圧力で封入したもの 2 本を使用した。検出効率が圧力にほぼ比例する事から、本報告書内では封入ガス圧 0.2 気圧のものを低感度検出器、1 気圧のものを高感度検出器と呼ぶことにする。

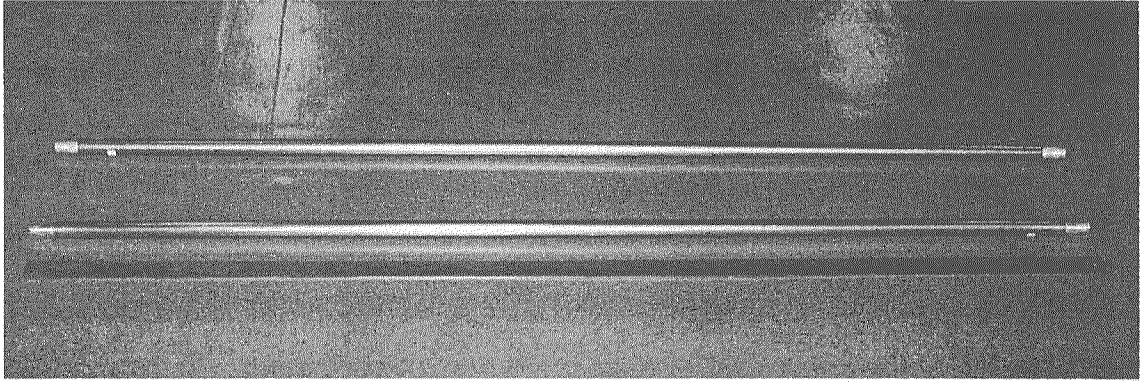


図 2.2.1 PSPC 外観写真

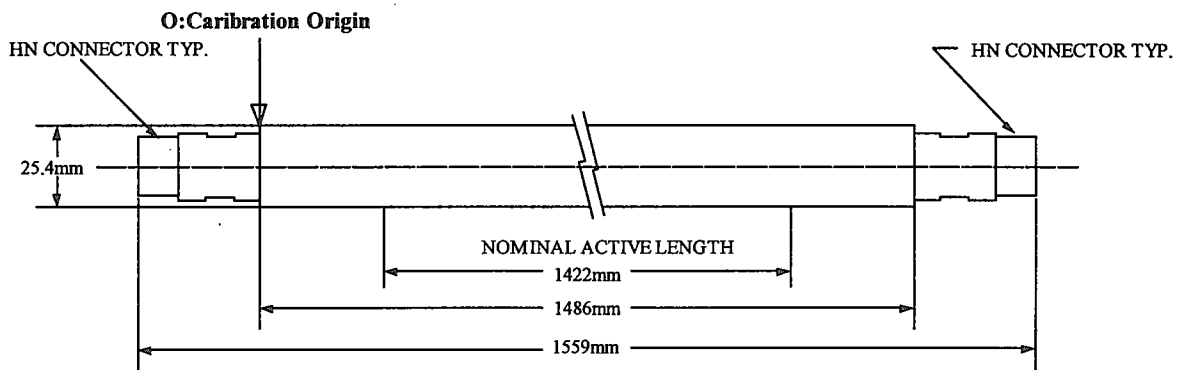


図 2.2.2 PSPC 構造図

2.3 位置キャリブレーション

PSPC の位置情報のキャリブレーションを行った。検出器、カドミウムコリメーター及び線源を図 2.3.1 のように配置した。スリットの間隔は 10mm とし、このときに使用した線源は ^{252}Cf (約 $50\mu\text{Ci}$) である。図 2.2.2 中の O の位置を 0 とし 1000mm までは 50mm 毎に、1000mm 以降は 100mm 毎に線源及びカドミウムコリメーターを移動し 300 秒間測定した。このデータをワークステーションで計算処理して、PSPC 全体を 1000 チャンネルに分割しチャンネル毎のカウント数を算出した。この一例をグラフにプロットすると図 2.3.2 のようなグラフが描ける。このグラフから半値幅が約 6 チャンネルであることがわかる。図 2.3.2 は線源位置 700mm 時のグラフであるが、線源がどの位置にあっても半値幅は約 6 チャンネルである。チャンネルを PSPC に当てはめると半値幅は 43mm になる。この 43mm のうち 10mm がスリットになるので、各点における測定の不確かさは 33mm であると考えられる。

各測定点での中性子束分布グラフからピークのチャンネルを読み取り、チャンネルと線源位置の関係を図 2.3.3 (低感度検出器) 及び図 2.3.4 (高感度検出器) にプロットした。本来チャンネルと位置の関係は線形になるはずであるが、図はどちらの検出器についても線形ではない。これは PSPC~プリアンプ間のケーブルが長いために、キャパシタンスが大きくなっているためと思われる。これを改善するために、今後ケーブルをできるだけ短くして再度測定を行う予定である。

図 2.3.3 及び図 2.3.4 のグラフを 3 次式でフィッティングするとチャンネル x と位置 $Pos_{L,H}$ (mm) の関係は下記の式で表される。図 2.3.3 及び図 2.3.4 には測定結果とあわせてフィッティング結果を実線で、信頼限界を点線で示してある。このフィッティングの不確かさ (1σ 相当) は 100mm の点で 8.2mm、700mm の点で 5.2mm、1400mm の点で 12.2mm 程度である。

・低感度検出器

$$Pos_L = -9.469 \times 10^{-5} x^3 + 9.473 \times 10^{-2} x^2 - 36.01x + 5701 \quad (2-2)$$

・高感度検出器

$$Pos_H = -1.727 \times 10^{-4} x^3 + 1.685 \times 10^{-1} x^2 - 60.36x + 8480 \quad (2-3)$$

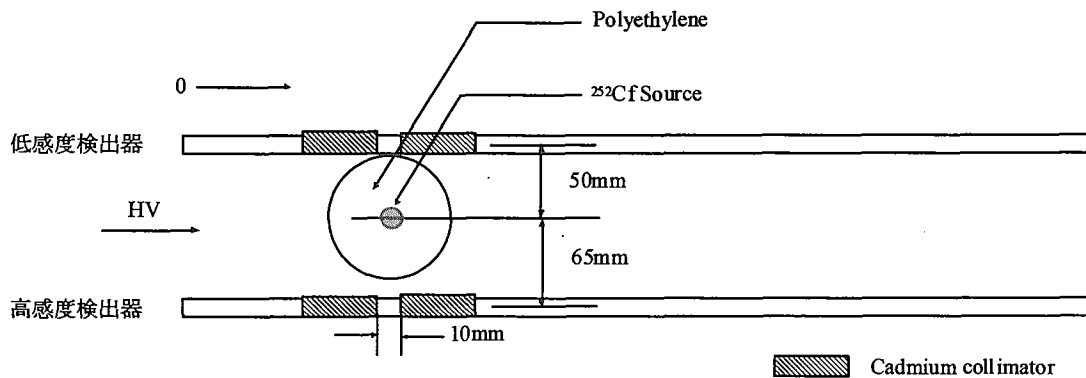


図 2.3.1 PSPC キャリブレーション図

今回行ったキャリブレーションは位置分解能についてのみ行ったため、位置による感度差の評価については行っていない。

PSPCに0.5mm厚のカドミウムを巻いたときと裸のときに²⁵²Cf線源を使用し1時間計数した。そのときの計数値と計数比を下記表2.3.1に示す。

表 2.3.1 PSPCにカドミウムを巻いたときと裸のときの計数値及び計数比

	低感度検出器	高感度検出器
計数値 (裸)	116,428	198,295
計数値 (Cd)	13,510	27,757
計数比 (裸/Cd)	8.62	7.14

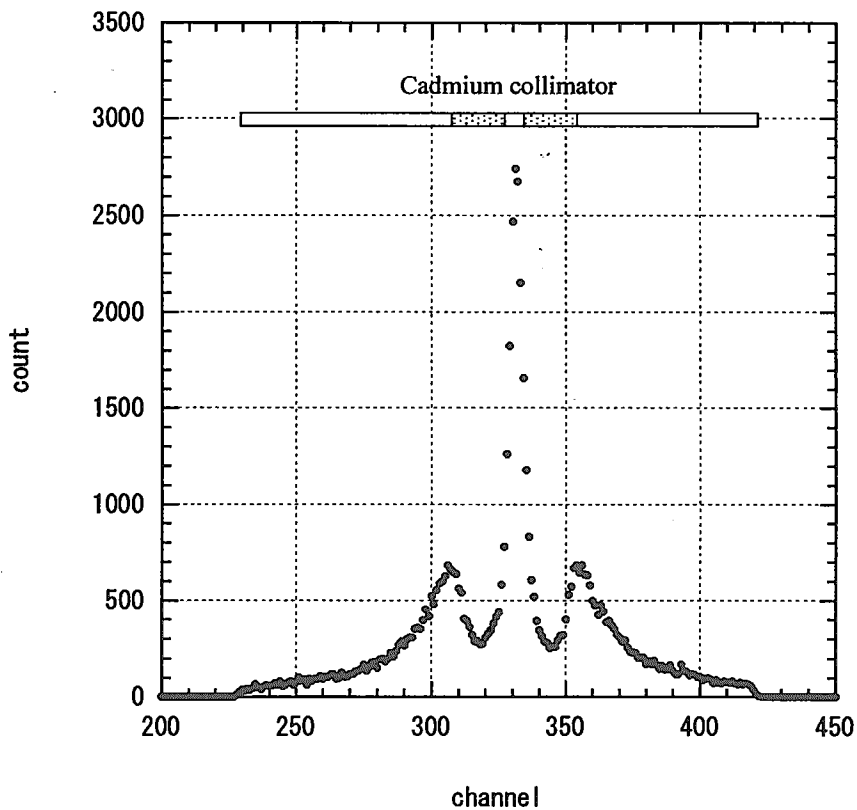


図 2.3.2 線源位置 700mm 時の中性子束分布

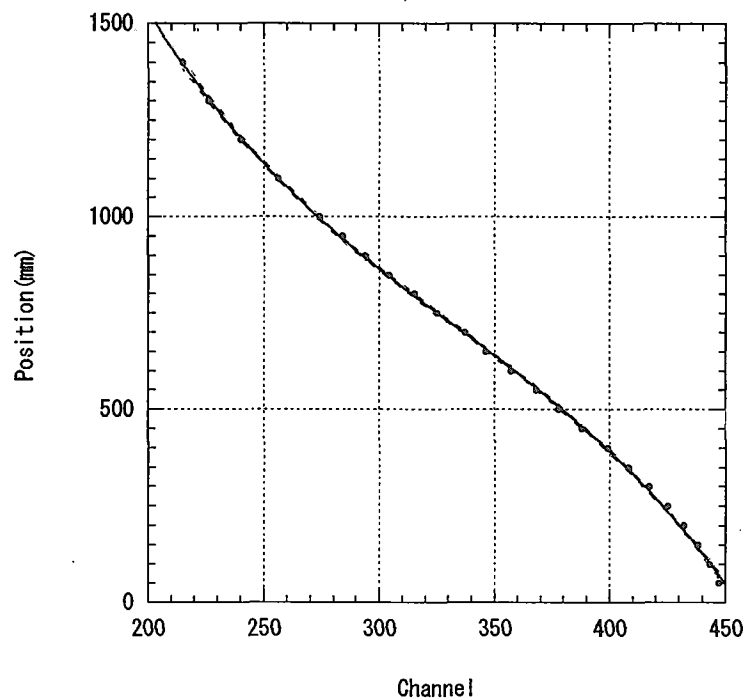


図 2.3.3 チャンネルと位置の関係 (低感度検出器)

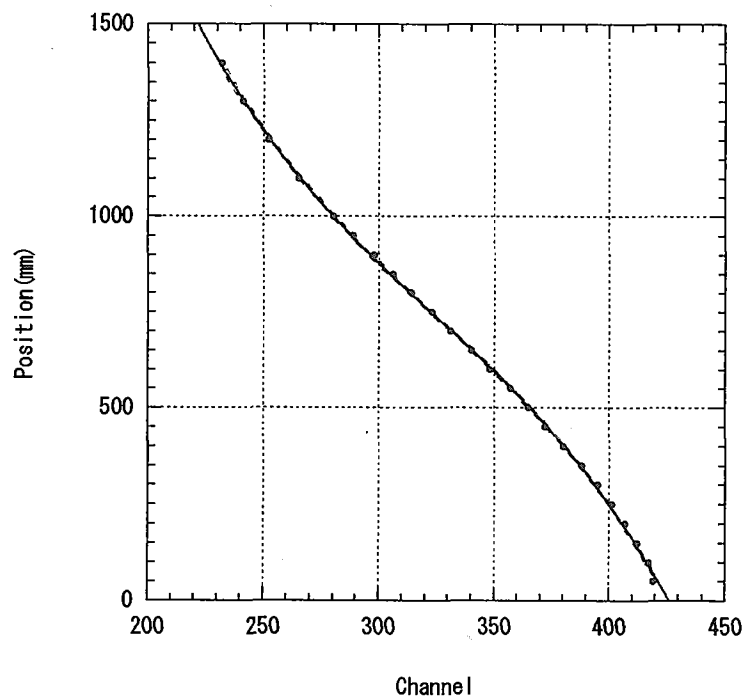


図 2.3.4 チャンネルと位置の関係 (高感度検出器)

2.4 測定系統図

図 2.4.1 に測定時のブロックダイアグラムを示す。PSPC 両端から出力された信号はプリアンプ及びメインアンプで増幅された後、4096 チャンネルウィルキンソン型 ADC に入力されワークステーションに蓄積される。また、パルス中性子測定実験時は図 2.4.1 左下の点線で囲まれた演算回路 (OR 回路) とタイムユニットが追加される。この演算回路には OR 回路の他にパルス中性子発生装置からのトリガー信号 (TTL) を反転する回路が組み込まれており、この反転された TTL 信号によりタイムユニットがリセットされる。タイムユニットは中性子が PSPC に入射した時刻情報を記録するためのものであり、トリガー信号によってリセットされてから (パルス中性子発生装置から中性子が発生してから) 100 μ 秒刻みの時刻を出力している。

使用機器の型式及び設定値を表 2.4.1 に示す。

表 2.4.1 使用機器型式及び設定値

モジュール名	製造元	型式	設定値
プリアンプ	CANBERRA	2006	
メインアンプ	ORTEC	570	COARSE GAIN:50 FINE GAIN:0.7 SHAPING TIME:3 μ sec POSITIVE OUT
高圧電源	ORTEC	659	Positive 1000V
ADC	Laboratory Equipment	4803A	GAIN:4k
リストアダプタ	Laboratory Equipment	LN-9100-I	WINDOW:3 μ sec DELAY:1.5 μ sec
リストコントロール	Laboratory Equipment	LN-9000	
リストメモリー	Laboratory Equipment	LN-9100	
演算回路	Laboratory Equipment	HR4OR	
タイムユニット	Laboratory Equipment	LN-9200T	TIME SCALE:100 μ sec

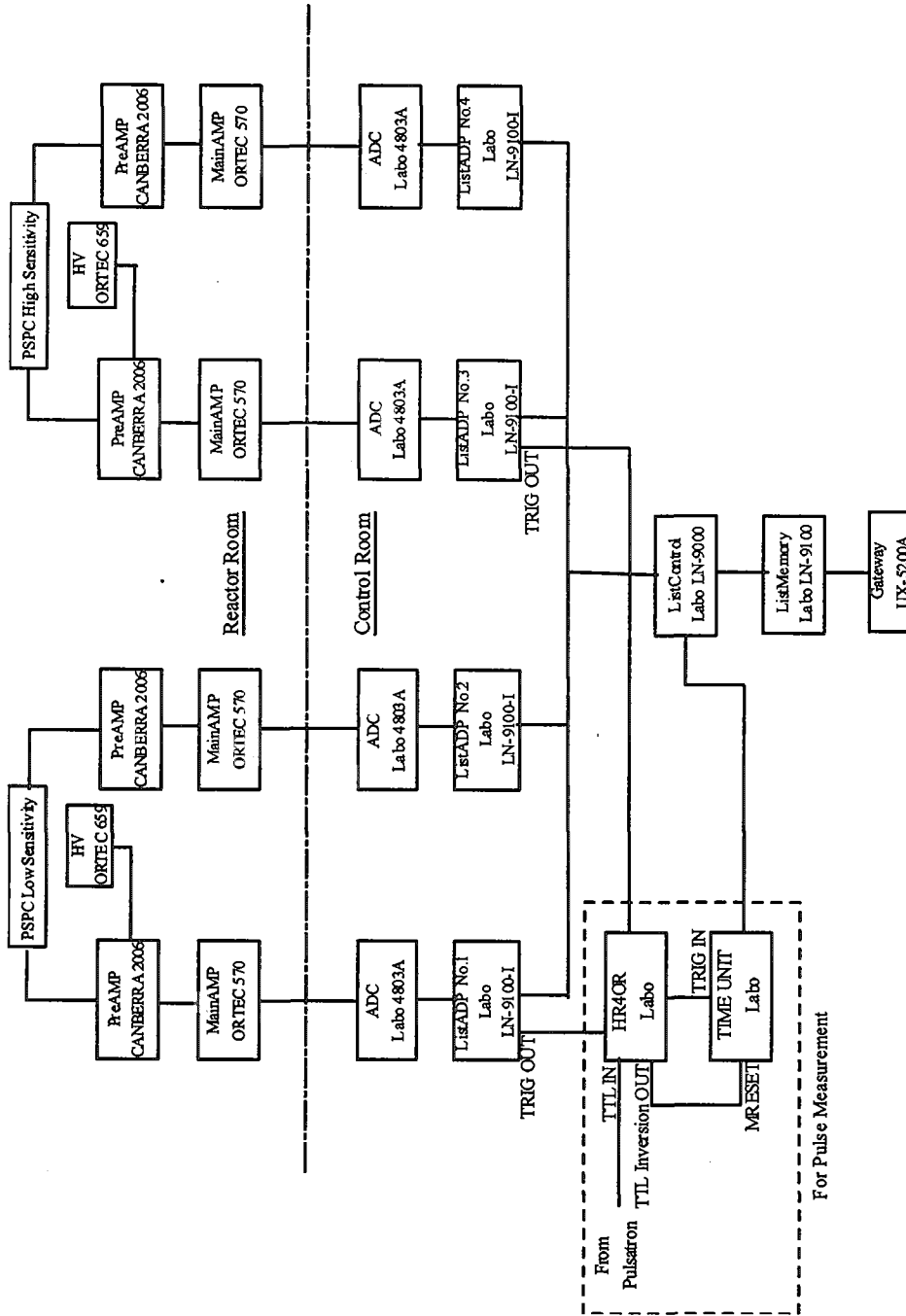


図 2.4.1 PSPC ブロックダイヤグラム

3. 測定条件及び測定結果

3.1 測定条件

前述した PSPC を使用し、STACY600 φ 円筒非均質炉心で測定を行った。炉心タンク寸法は図 3.1.1 に示すように直径 590mm、高さ 1500mm である。燃料は UO₂ 燃料棒及び 6% 濃縮硝酸ウラニル水溶液である。UO₂ 燃料棒は直径 9.5mm、長さ 1495mm であり、そのうちの 1420mm に直径 8.2mm、高さ 13.5mm の UO₂ ペレットが 105 個充填されており、ピッチ 21mm の正方格子配列で、221 本が図 3.1.2 に示すように円状に配置されている。

PSPC の設置状況は各 Run 毎に若干変更しているが、通常は裸体系のときは低感度検出器が炉心タンク表面から 30mm、高感度検出器が 90mm である。水反射体のときは低感度検出器のみ設置の場合が多く、炉心タンク表面から 90mm の位置に設置した。各 Run での PSPC の設置状況の図番号を下記表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 PSPC 設置状況の図番

Run#	図番号
379 (裸体系)	3.1.3
380 (水反射体系)	3.1.4
381,386,398 (水反射体系)	3.1.5
383,384,385,388,397,400 (裸体系)	3.1.6
387 (裸体系)	3.1.7
389~396 (裸体系-温度係数)	3.1.8
399 (裸体系)	3.1.9
401 (水反射体系)	3.1.10

また、各 Run での測定データの液位、未臨界度、及び測定時間等を表 3.1.2 及び表 3.1.3 に示す。

尚、本報告書内での未臨界度 (反応度(\$)) は下記の式によって求めている。

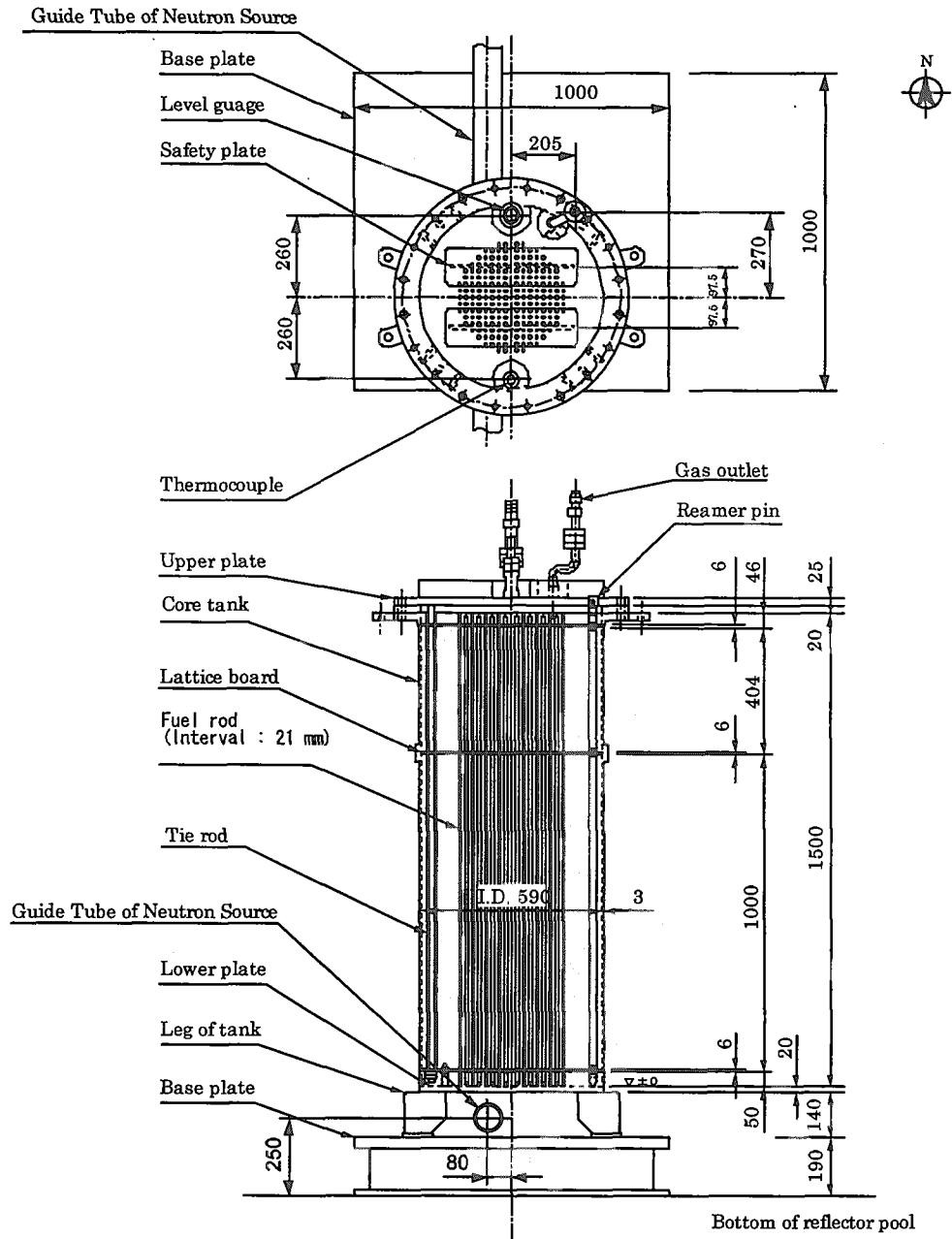
$$\rho = -\frac{C}{2} \left[\frac{1}{(H+\lambda)^2} - \frac{1}{(H_c+\lambda)^2} \right] \quad (3-1)$$

C: 換算係数

H: 溶液液位(mm)

H_c: 臨界液位(mm)

λ: 外挿距離(mm)



(単位 : mm)

図 3.1.1 STACY600 φ 非均質炉心タンク図

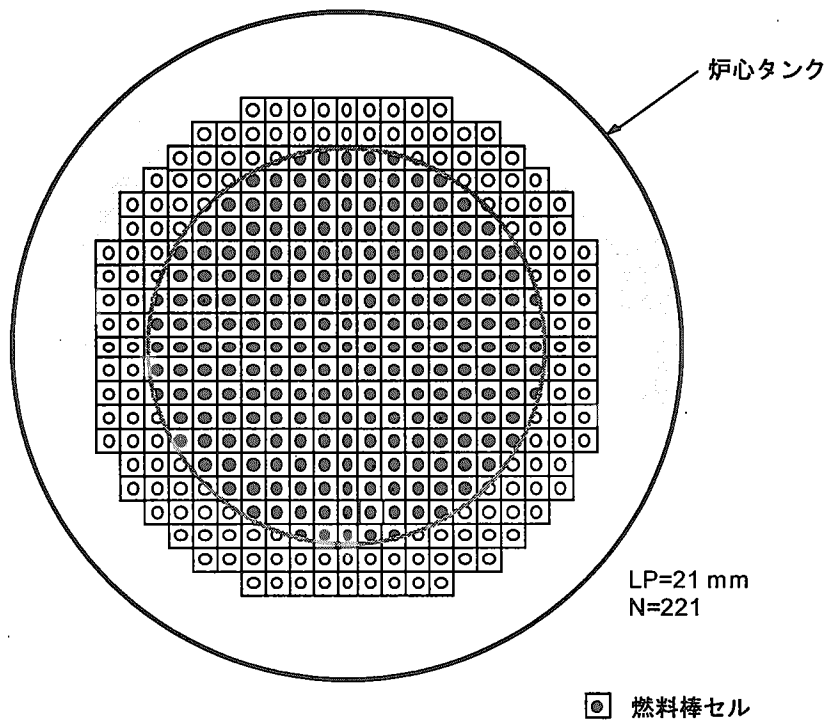


図 3.1.2 UO₂燃料棒配列図

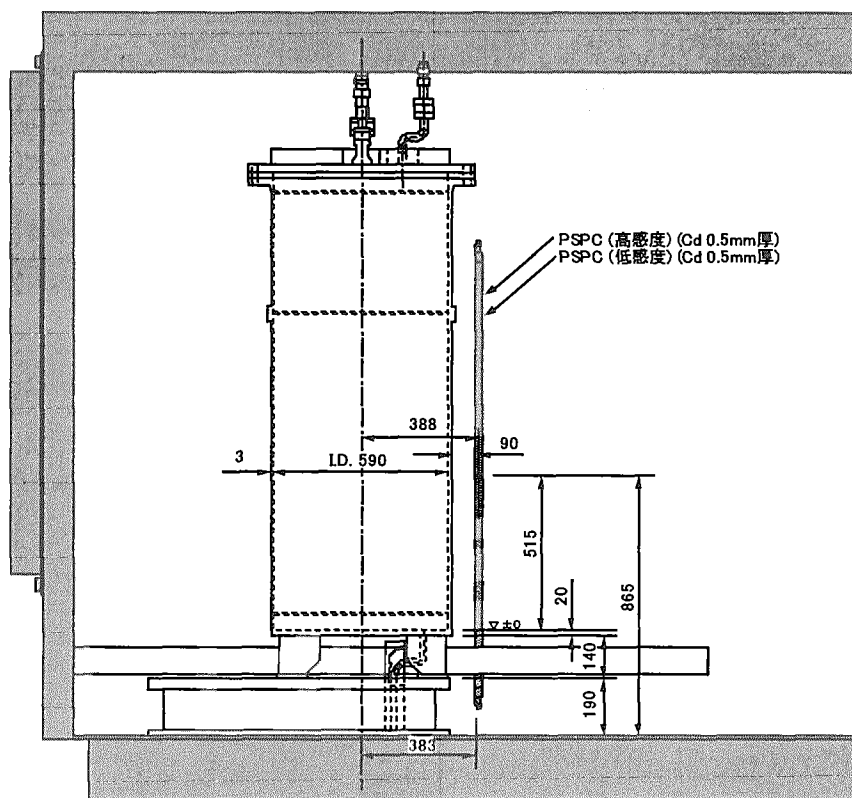
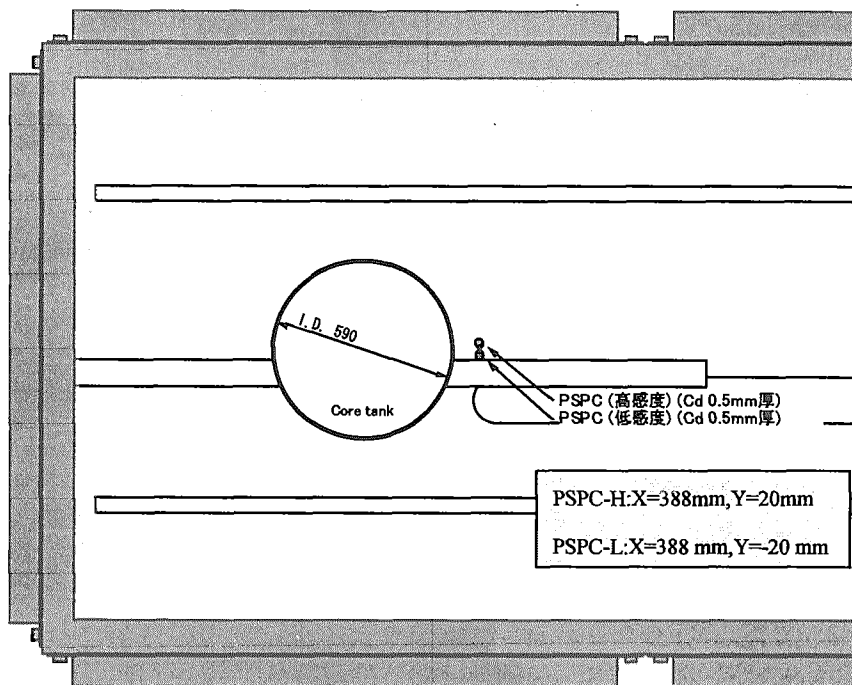
表 3.1.2 測定データ一覧表 (1)

Date	Run #	Reflector	U Concentration (g/L)	H(mm)	Reactivity (\$)	Measurement Time(sec)	Detector Configuration				Note
							Low		High		
							Distance(mm)	Cd	Distance(mm)	Cd	
2002.7.31	379	Bare	213	440.2	-1.73	300	90	○	90	○	
				449.2	-1.24	300					
				458.9	-0.74	300					
				462.9	-0.54	1515					
				469.0	-0.24	300					
2002.8.1	380	Water	213	224.9	-27.39	300	140	×	140	×	
				420.1	-1.51	300					
				428.8	-1.02	300					
				438.2	-0.53	300					
				442.0	-0.34	1002					
				Hc= 449.1	0.00	300					
2002.8.7	381	Water	213	420.7	-1.46	300	90	○	-	-	
				429.7	-0.96	1800					
				439.1	-0.47	300					
				443.0	-0.28	300					
				Hc= 448.7	0.00	300					
2002.8.22	383	Bare	213	236.9	-28.64	600	30	○	90	○	
				453.7	-1.01	600					
				463.7	-0.51	600					
				467.8	-0.32	1800					
				Hc= 474.6	0.00	600					
2002.8.23	384	Bare	213	453.7	-1.02	2654	30	○	90	○	
				463.7	-0.53	600					
				467.8	-0.33	600					
				Hc= 474.8	0.00	900					
				Hc= 474.9	0.00	900					
2002.9.26	385	Bare	150	254.5	-26.00	300	30	○	-	-	
				340.0	-11.67	100					
				417.5	-4.98	100					
				482.9	-1.49	1800					
				494.7	-0.99	100					
				507.4	-0.49	100					
				512.7	-0.29	100					
2002.9.27	386	Water	150	453.3	-2.06	100	90	○	-	-	
				473.5	-1.06	100					
				485.8	-0.52	100					
				490.9	-0.30	1800					
2002.10.2	387	Bare	150	260.4	-24.55	300	タンク底面	○	タンク水平	○	
				340.0	-11.69	600					
				417.3	-5.01	600					
				494.5	-1.01	600					
				507.2	-0.51	600					
				512.5	-0.32	600					
				Hc= 520.8	0.00	900					
2002.10.3	388	Bare	150	340.0	-11.70	600	30	○	90	○	
				417.3	-5.03	600					
				494.5	-1.02	600					
				507.2	-0.52	600					
				512.5	-0.32	600					
				Hc= 521.4	0.00	1800					
2002.10.15	389	Bare	150	493.9	-0.95	300	-	-	130	○	Solution Temp 25°C
				506.5	-0.46	300					
				511.8	-0.26	300					
				Hc= 518.9	0.00	900					
2002.10.15	390	Bare	150	499.9	-0.93	300	-	-	130	○	Solution Temp 35°C
				513.0	-0.44	300					
				518.4	-0.24	300					
				Hc= 525.3	0.00	900					
				Hc= 525.5	0.00	900					
2002.10.16	391	Bare	150	261.7	-24.40	300	-	-	130	○	Solution Temp 30°C
				496.4	-0.97	300					
				509.1	-0.48	300					
				514.4	-0.28	300					
				Hc= 522.3	0.00	900					
2002.10.16	392	Bare	150	Hc= 525.8	0.00	900	-	-	130	○	Solution Temp 35°C
2002.10.17	393	Bare	150	494.4	-0.99	300	-	-	130	○	Solution Temp 27°C
				507.1	-0.50	300					
				512.4	-0.30	300					
				Hc= 520.7	0.00	900					
2002.10.17	394	Bare	150	501.5	-0.98	300	-	-	130	○	Solution Temp 40°C
				514.6	-0.49	300					
				520.1	-0.30	300					
				Hc= 528.6	0.00	900					
2002.10.18	396	Bare	150	263.6	-23.79	300	-	-	130	○	Solution Temp 37°C
				500.0	-0.98	300					
				513.1	-0.49	300					
				518.6	-0.29	900					

表 3.1.3 測定データ一覧表 (2)

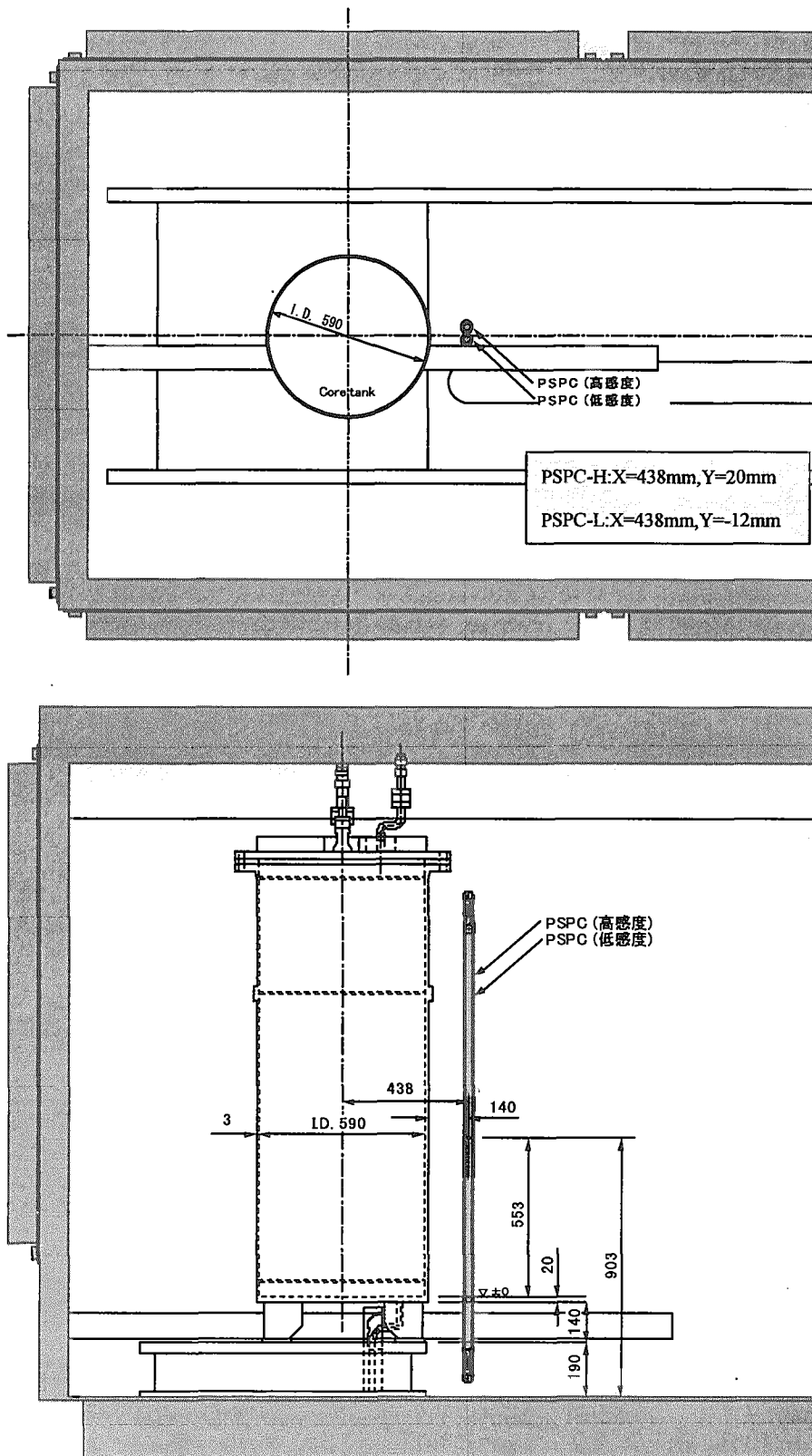
Date	Run #	Reflector	U Concentration (g/L)	H(mm)	Reactivity (β)	Measurement Time(sec)	Detector Configuration				Note
							Low		High		
							Distance(mm)	Cd	Distance(mm)	Cd	
2002.10.23	397	Bare	100	288.0	-20.80	600	30	○	90	○	
				340.0	-13.42	600					
				417.3	-6.74	600					
				541.7	-1.04	600					
				558.1	-0.55	1800					
				565.1	-0.35	600					
				Hc= 577.8	0.00	717					
2002.10.24	398	Water	100	279.2	-19.69	600	90	○	-	-	
				340.0	-11.65	600					
				417.3	-5.63	600					
				523.0	-1.00	2400					
				539.3	-0.50	600					
				546.2	-0.31	600					
				Hc= 557.2	0.00	900					
2002.10.25	399	Bare	100	Hc= 577.9	0.00	1800	タンク底面	○	490	○	
2002.10.31	400	Bare	50	417.3	-8.63	600	30	○	90	○	PNS,9kp(10PPS) PNS,9kp(10PPS) PNS,9kp(20PPS) PNS,25kp(20PPS) PNS,27kp(20PPS)
				614.1	-0.99	600					
				637.7	-0.50	600					
				647.8	-0.30	1200					
				Hc= 663.9	0.00	600					
				646.6	-0.30	2400					
				635.6	-0.51	2400					
				610.4	-1.00	450					
				587.8	-1.49	1250					
				531.7	-3.03	1350					
2002.11.6	401	Water	50	600.9	-0.99	600	90	-	90	○	PNS,9kp(10PPS) PNS,9kp(10PPS) PNS,18kp(20PPS) PNS,25kp(20PPS) PNS,27kp(20PPS)
				625.0	-0.50	600					
				635.4	-0.29	1800					
				Hc= 647.0	0.00	600					
				635.4	-0.29	2400					
				625.0	-0.49	2400					
				600.9	-0.96	900					
				579.2	-1.45	1250					
				525.1	-2.88	1350					

※PNS:パルス中性子法測定実験



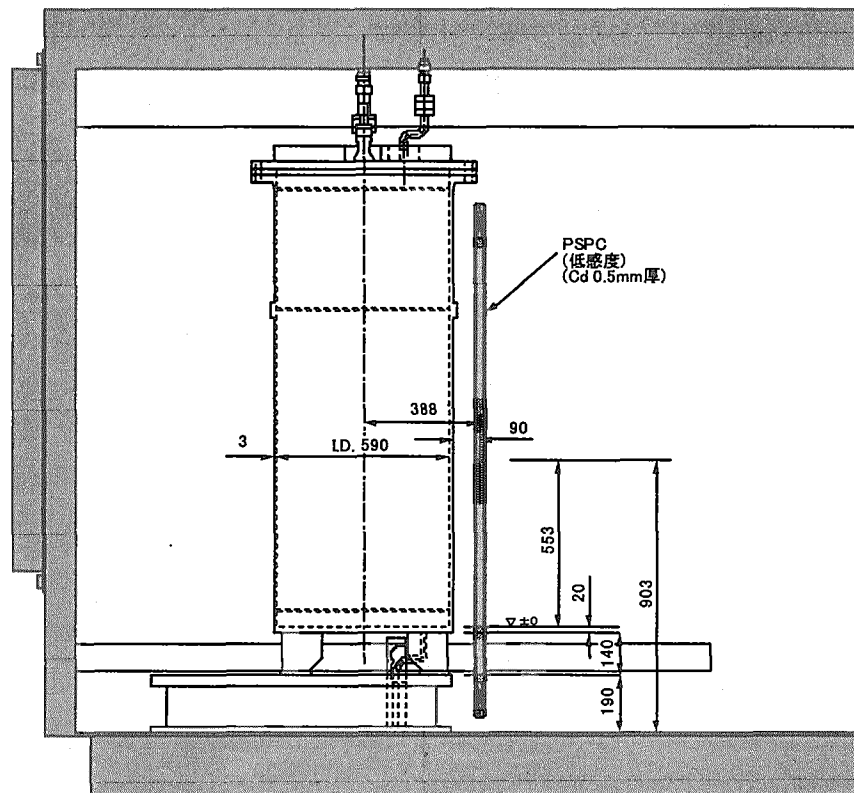
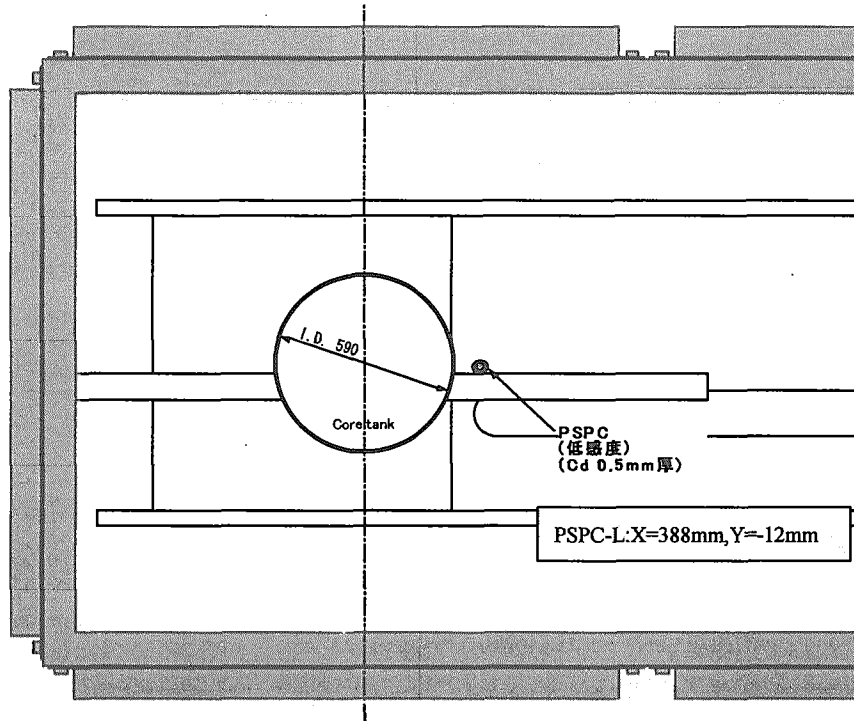
(单位 : mm)

图 3.1.3 PSPC 設置図 (Run379 (裸体系))



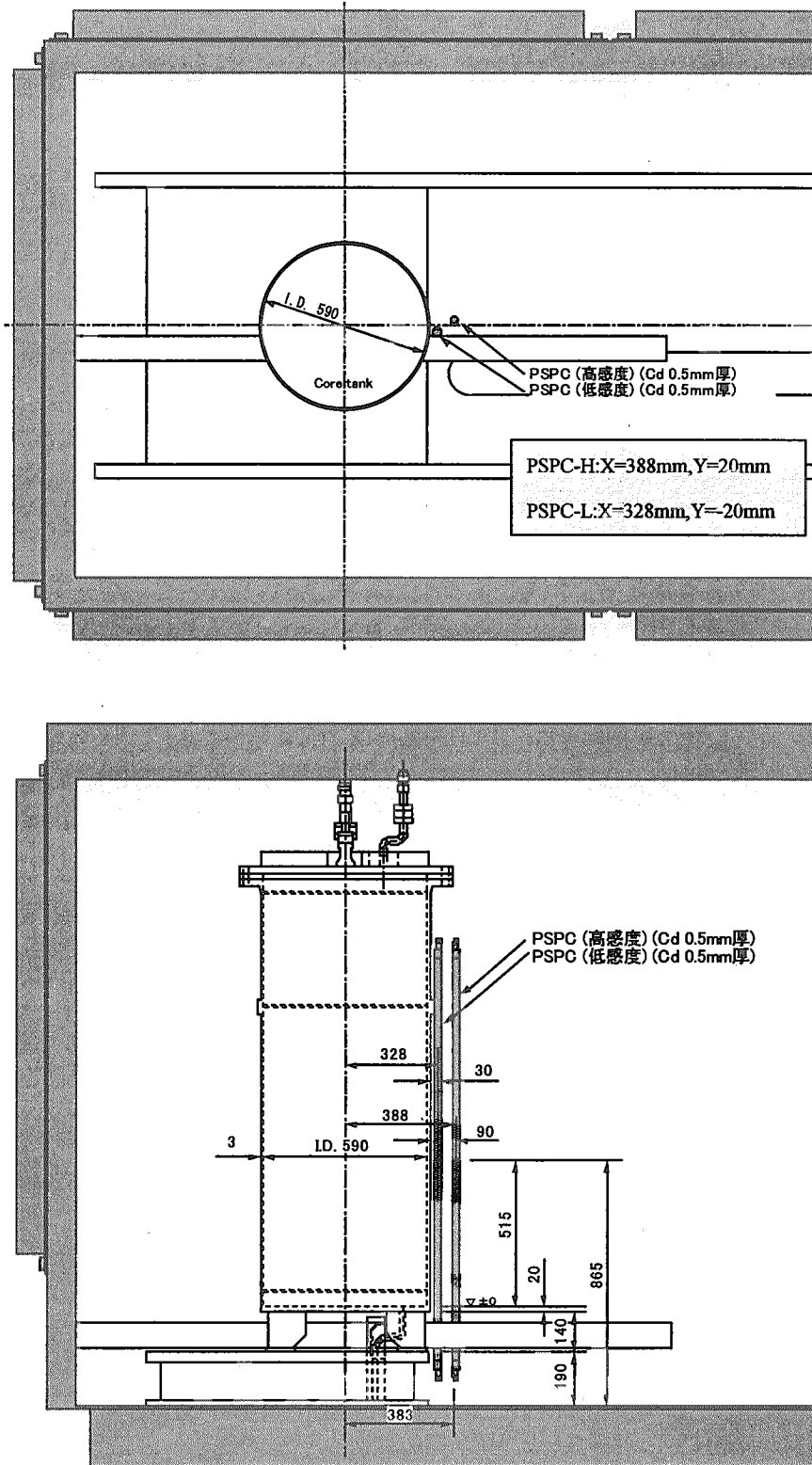
(単位 : mm)

図 3.1.4 PSPC 設置図 (Run380 (水反射体系))



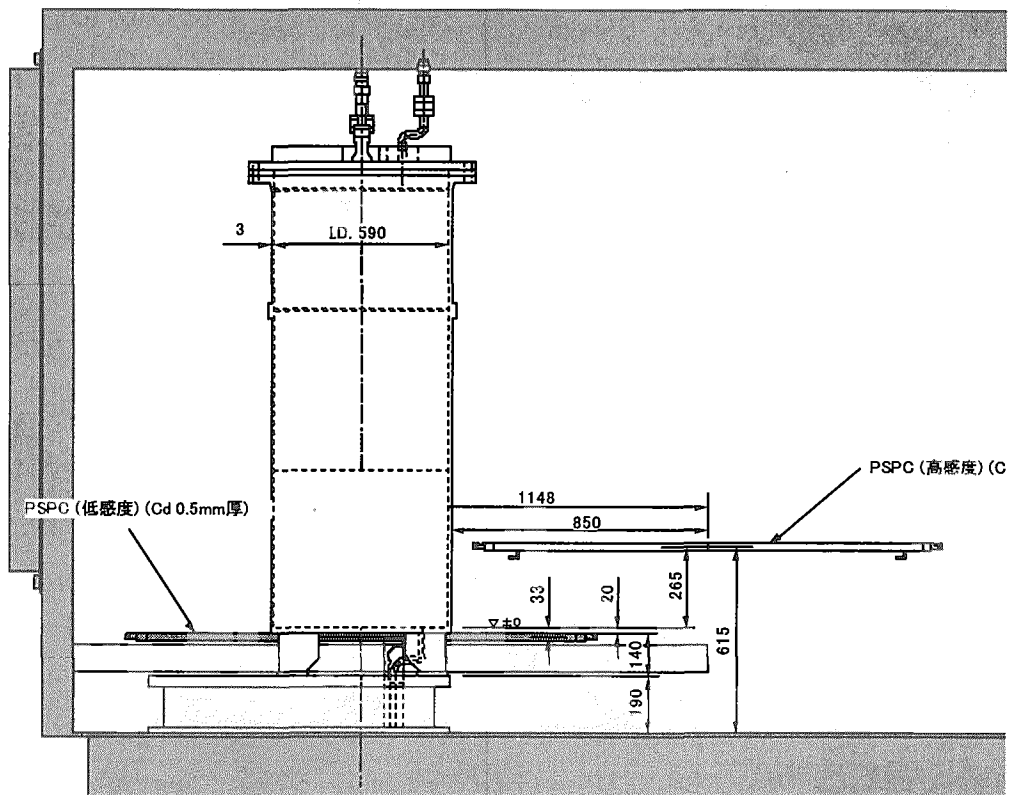
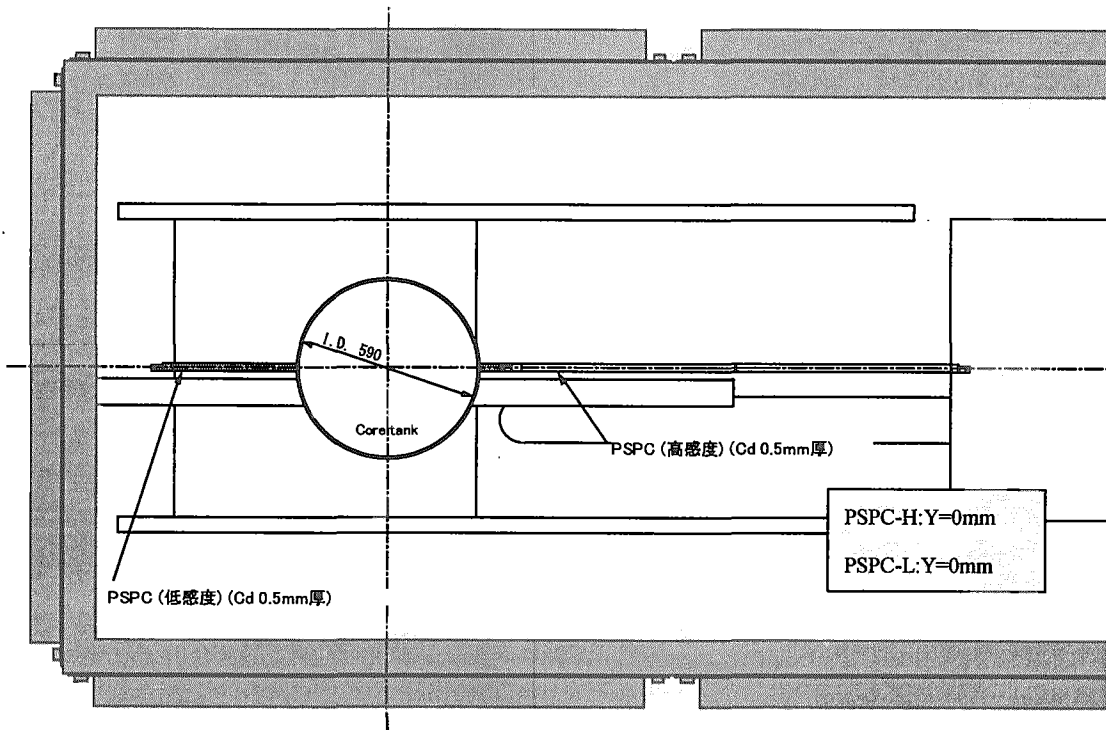
(単位 : mm)

図 3.1.5 PSPC 設置図 (Run381, Run386, Run398 (水反射体系))



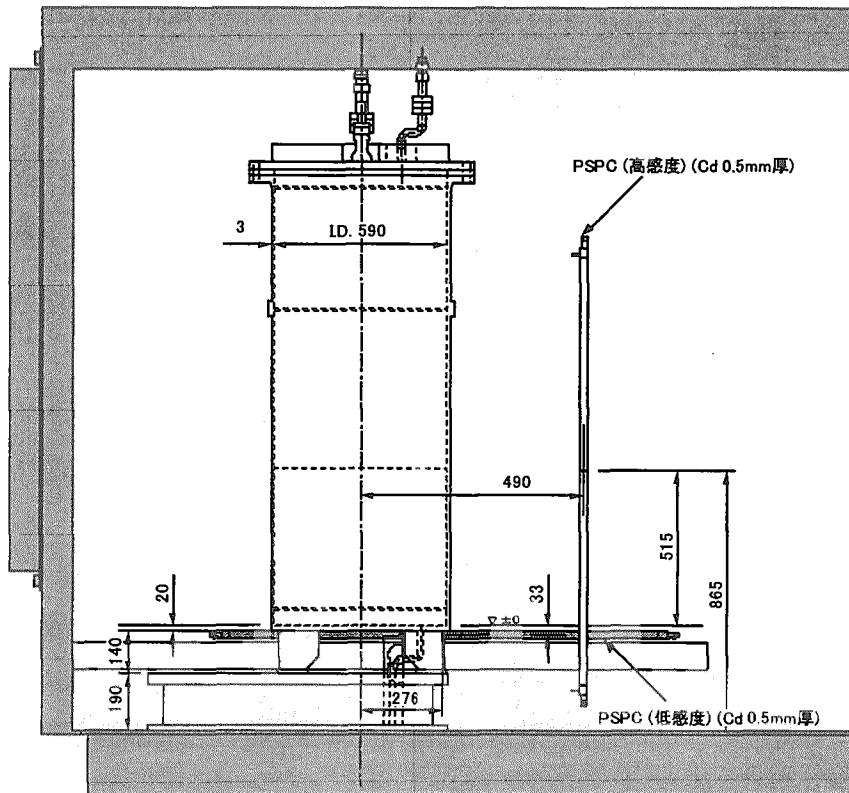
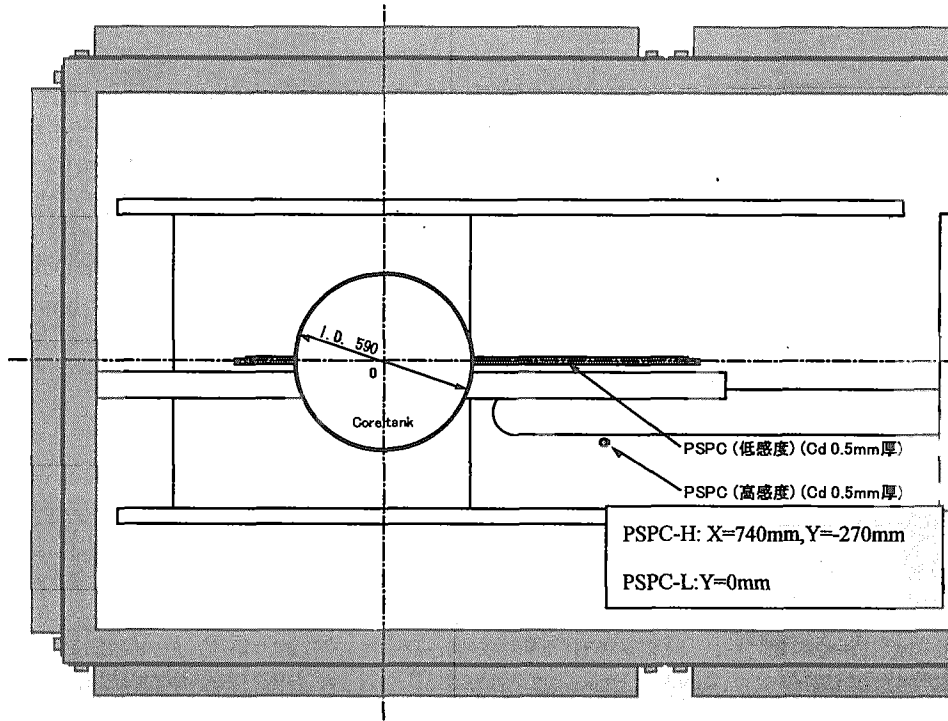
(単位 : mm)

図 3.1.6 PSPC 設置図 (Run383, Run384, Run385, Run388, Run397, Run400 (裸体系))



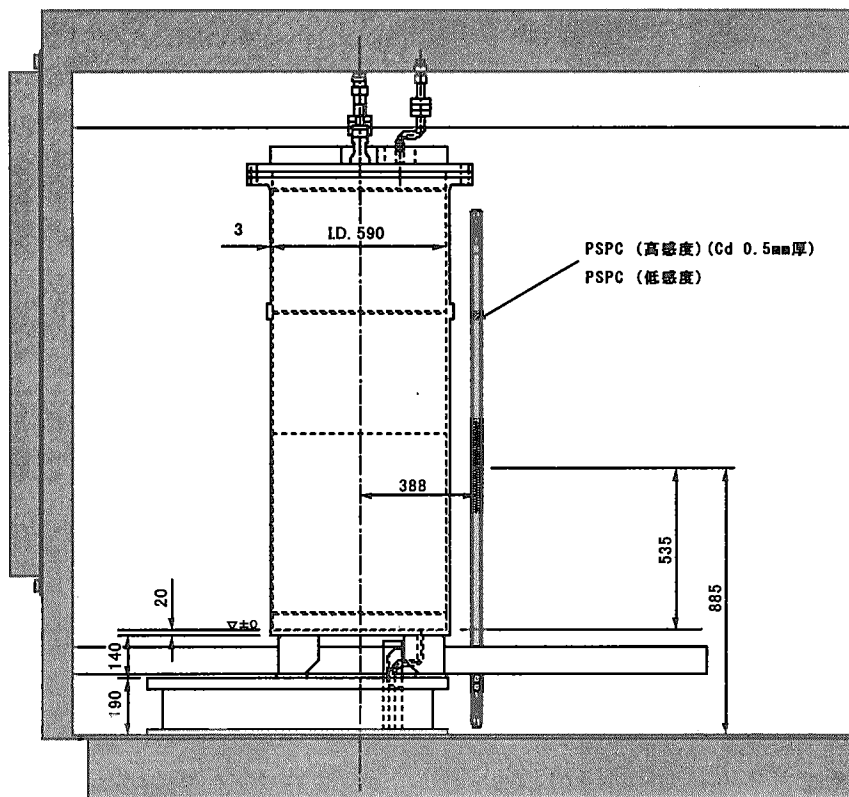
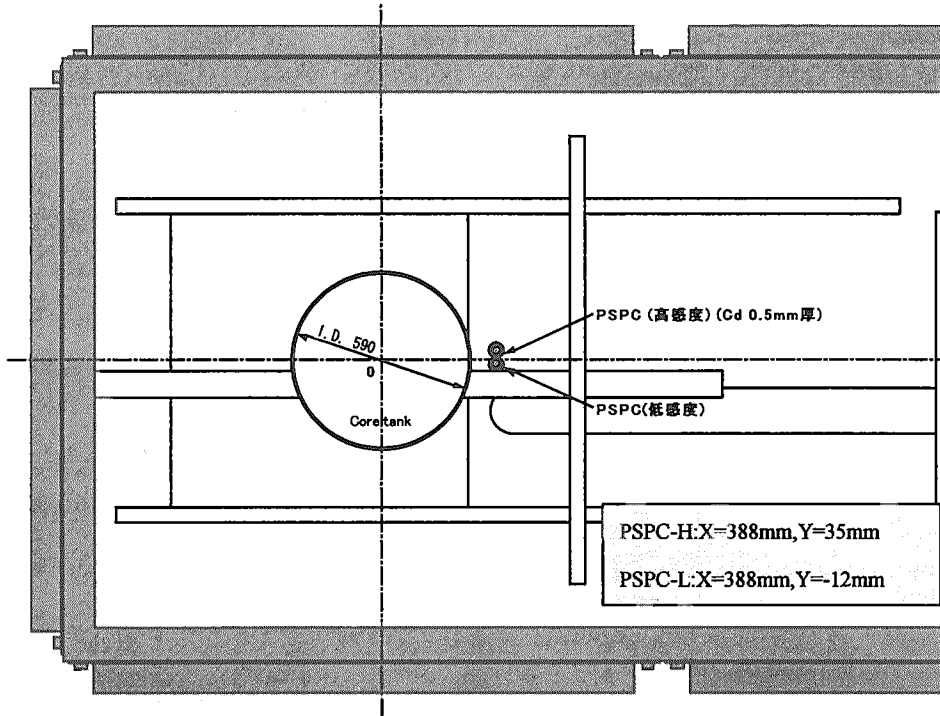
(単位 : mm)

図 3.1.7 PSPC 設置図 (Run387 (裸体系))



(単位 : mm)

図 3.1.9 PSPC 設置図 (Run399 (裸体系))



(単位 : mm)

図 3.1.10 PSPC 設置図 (Run401 (水反射体系))

3.2 中性子束分布測定結果

PSPC 低感度検出器及び PSPC 高感度検出器による中性子束分布の測定結果を図 3.2.1～図 3.2.31 に示す。これらの図の番号を検出器の種類、反射体の有無、分布の測定方向、Cd カバーの有無によって分類すると、以下のようになる。

表 3.2.1 PSPC 測定結果の分類

分類	検出器種類	反射体	分布測定方向	Cd カバー	保温材	図番号
①	低感度	なし	軸方向	あり	なし	図 3.2.1, 図 3.2.6, 図 3.2.8, 図 3.2.10, 図 3.2.14, 図 3.2.23, 図 3.2.28
②	低感度	なし	径方向	あり	なし	図 3.2.12, 図 3.2.26
③	高感度	なし	軸方向	あり	なし	図 3.2.2, 図 3.2.7, 図 3.2.9, 図 3.2.15, 図 3.2.24, 図 3.2.27, 図 3.2.29
④	高感度	なし	径方向	あり	なし	図 3.2.13
⑤	高感度	なし	軸方向	あり	あり	図 3.2.16, 図 3.2.17, 図 3.2.18, 図 3.2.19, 図 3.2.20, 図 3.2.21, 図 3.2.22
⑥	低感度	水	軸方向	あり	なし	図 3.2.5, 図 3.2.11, 図 3.2.25
⑦	低感度	水	軸方向	なし	なし	図 3.2.3, 図 3.2.30
⑧	高感度	水	軸方向	あり	なし	図 3.2.31
⑨	高感度	水	軸方向	なし	なし	図 3.2.4

測定結果から、上表の各分類について以下のことが分かる。

3.2.1 裸体系における中性子束分布測定結果について

・裸体系における軸方向分布の測定結果は、上記の分類①、分類③、分類⑤の各図に示されている。これらの図に示すように、各測定において、裸体系における未臨界時および臨界時の中性子束分布が得られた。これらの図から、中性子束分布は、未臨界度が深くなると中性子源の影響が大きくなること、及び図 3.2.34 の R397 において中性子束分布を臨界時のピーク値に規格化した図に示すように、未

臨界度が-1\$程度になると、中性子源の影響が小さくなり、臨界時とほぼ同じ分布を示すことが分かる。

- ・分類①の各図に示すように、裸体系における低感度検出器による測定結果では、タンクの下部約 100mm の位置にピークがある。このピークは、PSPC の端部にカドミウムを巻くことが出来ないため、この端部から検出器内に入射した中性子の検出によるものと考えられる。また、分類⑥及び分類⑧の各図に示すように、水反射体系における測定値では、このようなピークはないため、端部から入射する中性子は、図 3.2.32 に示すように、反射体水槽の床面で反射していると考えられる。分類番号③に示すように、裸体系における高感度検出器による測定結果では、未臨界時に低感度検出器と同様なピークが現れている場合があるが、臨界時においては、ピークはないものの、液位ゼロ以下の部分に小さな凸がある。

- ・低感度検出器、高感度検出器ともに、溶液部分における中性子束分布のピークは、ピークの上半分と下半分で非対称となっている。この原因の一つとして、上記の反射体水槽の床面における中性子の反射効果が挙げられる。図 3.2.33 に示すように、例として Run384 における高感度検出器の測定結果に対して、ピークの上半分のデータのみを使用して余弦分布でフィッティングし、ピークの下半分のデータからフィッティングした値を差し引くと、この床面からの中性子の反射によると考えられる寄与分を表すことができる。

- ・分類⑤の各図に示す溶液温度 25℃、27℃、35℃、37℃、40℃の各温度点における高感度検出器による測定値のうち、臨界時における分布を R389 のピーク値に規格化してプロットしたものを図 3.2.35 に示す。この図から、中性子束分布の測定値は、溶液温度の違いに依らず、ほぼ同じ分布を示していることが分かる。

- ・分類②の各図に示すように、低感度検出器を炉心タンクの真下に設置した場合の測定値は、炉心部でほぼ余弦分布となった。炉心タンクの外側では、グラフの横軸のプラス側よりも、マイナス側の方の中性子束が高くなっている。これは、マイナス側は反射体水槽の壁に近く、この壁で反射した中性子の影響を受けているためであると考えられる。

- ・分類④の図 3.2.13 に示すように、高感度検出器をタンク表面から約 100mm 離して水平に設置した場合の測定結果は、タンク表面から 250mm の位置で中性子束はピークを示し、その位置よりタンクに近づいても中性子束は減少することを示している。これは、PSPC の有感部のうち、タンク表面から 250mm までの位置、すなわち有感部の端部の約 110mm では、感度が悪いためであると考えられる。この部分における感度の低下について、今後測定により定量的に示す予定である。

3.2.2 水反射体系における中性子束分布測定結果について

- ・分類⑥～分類⑨の各図に示すように、各測定において、水反射体系における未

臨界時および臨界時の中性子束分布が得られた。中性子束分布は、未臨界度が深くなっても、中性子源の影響は裸体系の測定結果に比べると小さいこと、また R380 において中性子束分布を臨界時のピーク値に規格化した図 3.2.36 に示すように、未臨界度が -1.5% 程度になると、臨界時とほぼ同じ分布を示すことが分かる。

・図 3.2.5 に示すように、R381 における測定値には、約 1200mm の位置に中性子束分布のピークがある。これは、PSPC にカドミウムを巻く際に、PSPC の有感部全体にカドミウムを巻いていなかったためであると考えられる。

・分類⑦及び分類⑨の各図に示すように、カドミウムカバーなしの測定結果では、カドミウムカバー付きの結果に比べて、溶液部分における中性子束分布のピーク部分がその半分の高さから上の部分と下の部分で対称に近い形になっている。これに対して、分類⑥と分類⑧の各図に示すように、カドミウムカバー付きの測定結果では、中性子束分布は、ピークの上半分と下半分で非対称となっている。これは、裸体系における場合と同様に、カドミウムを PSPC の端部に巻くことができないため、そこから検出器内に入射した中性子による影響により、ピーク部分の形が歪んだと考えられる。

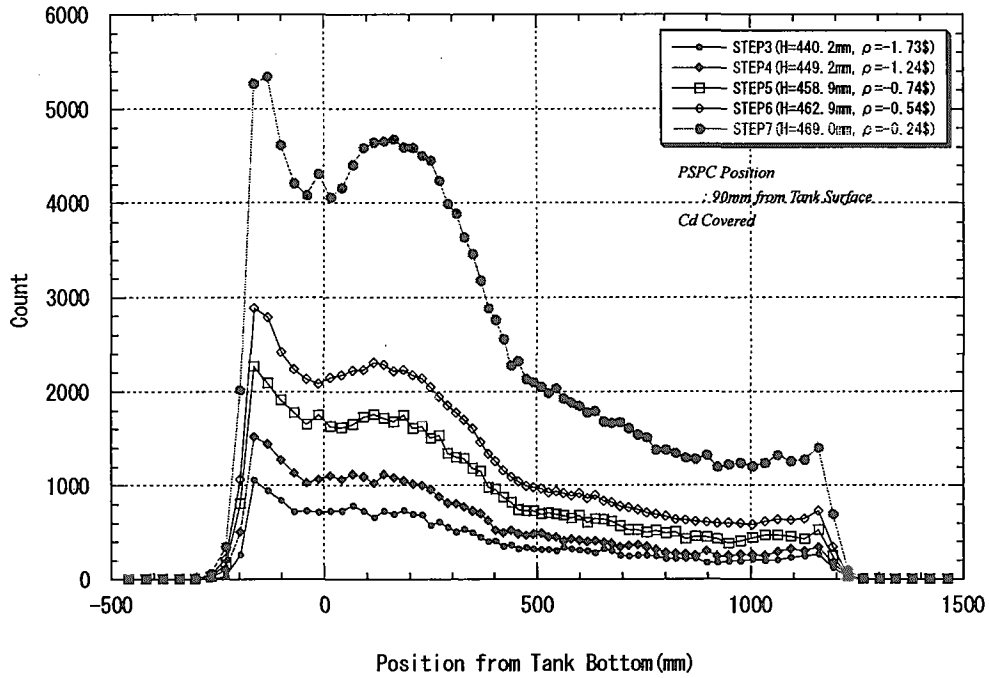


図 3.2.1 中性子束分布 (R379 (裸体系) 低感度検出器)

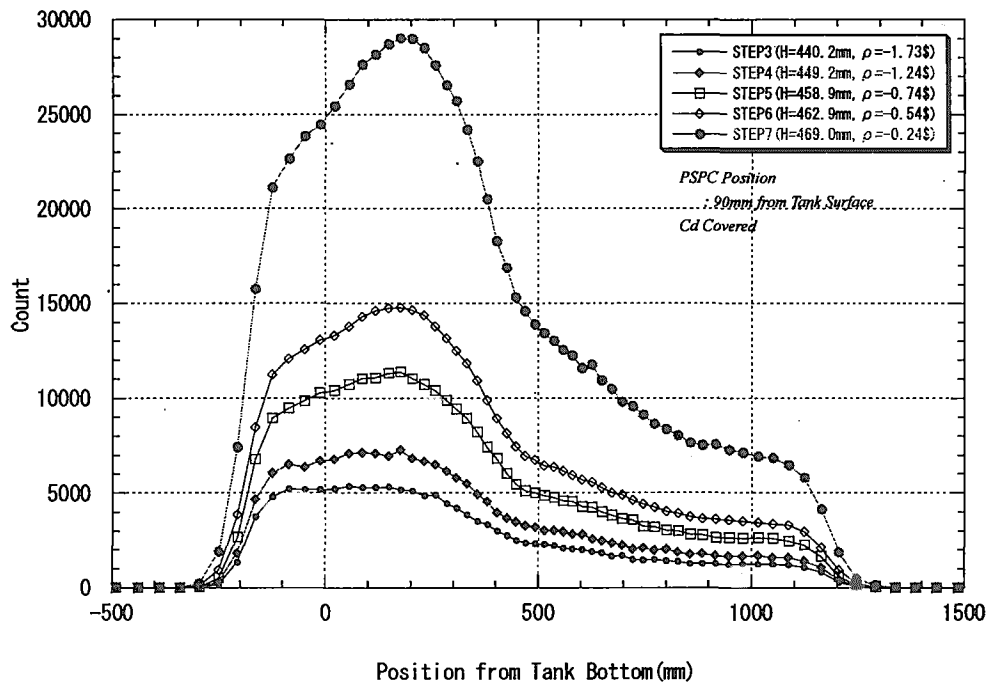


図 3.2.2 中性子束分布 (R379 (裸体系) 高感度検出器)

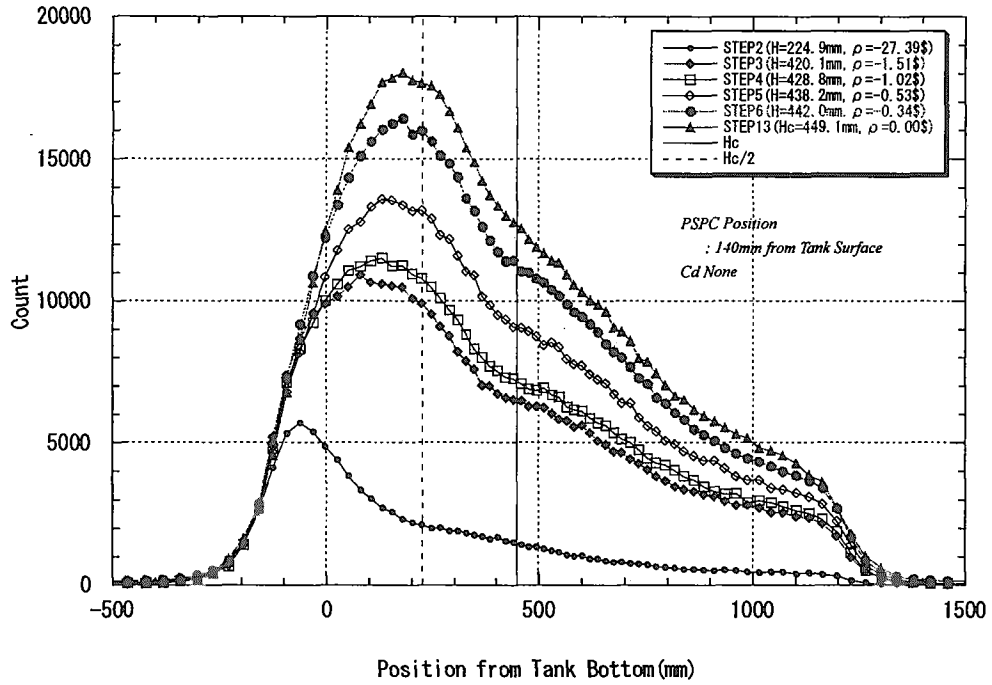


図 3.2.3 中性子束分布 (R380 (水反射体系) 低感度検出器)

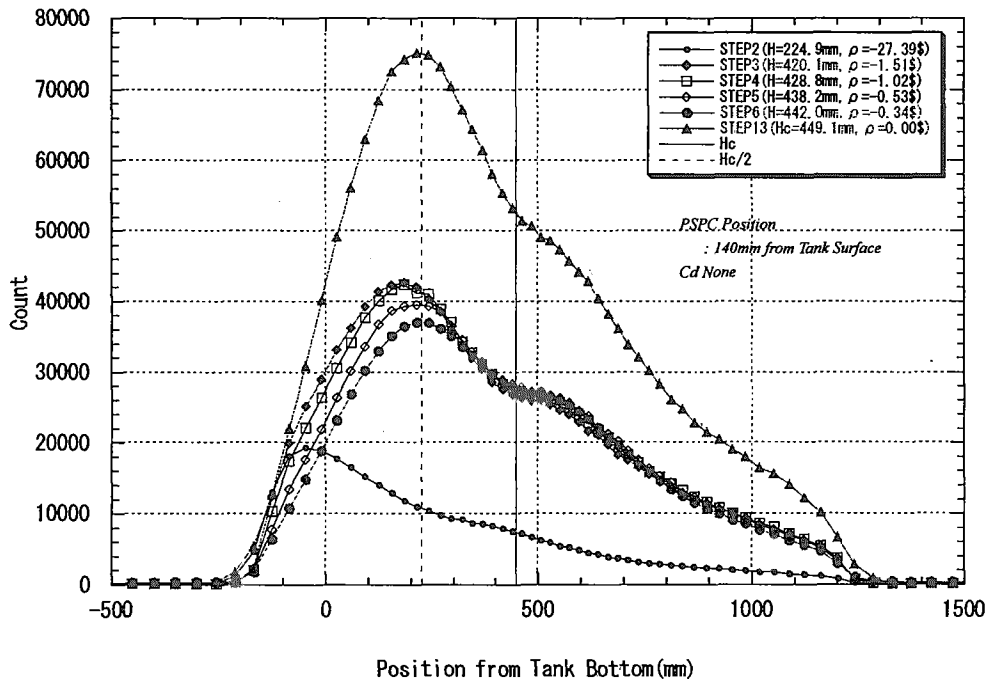


図 3.2.4 中性子束分布 (R380 (水反射体系) 高感度検出器)

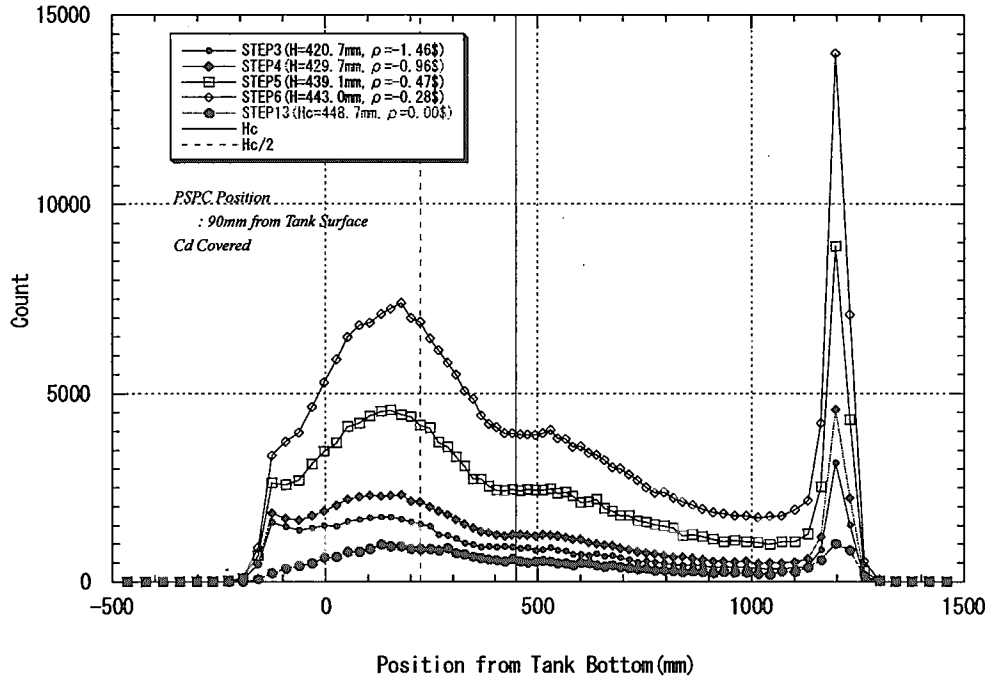


図 3.2.5 中性子束分布 (R381 (水反射体系) 低感度検出器)

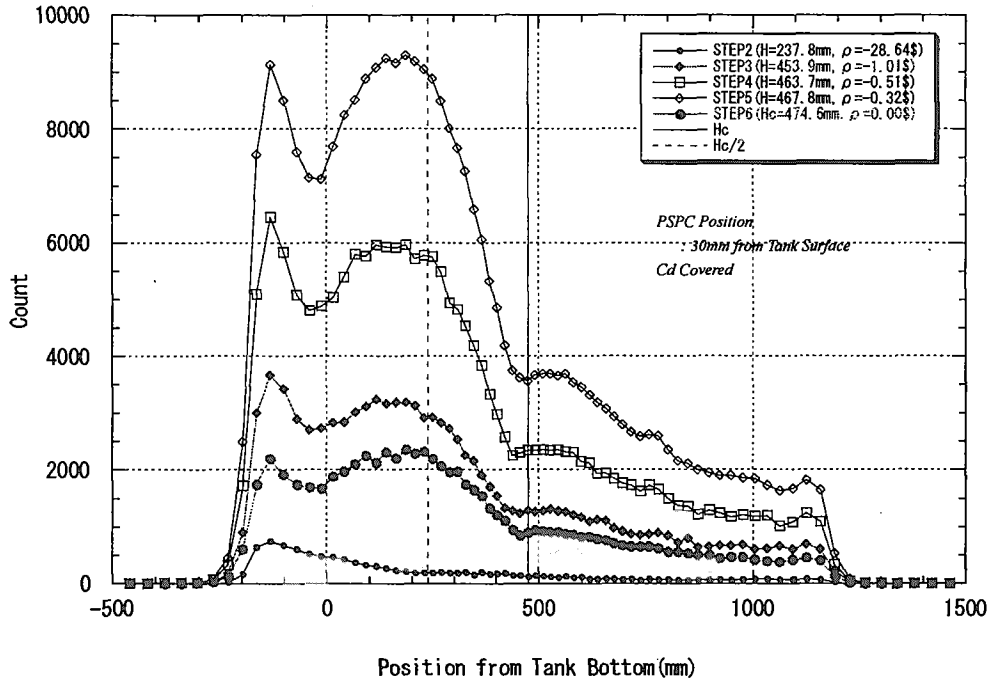


図 3.2.6 中性子束分布 (R383 (裸体系) 低感度検出器)

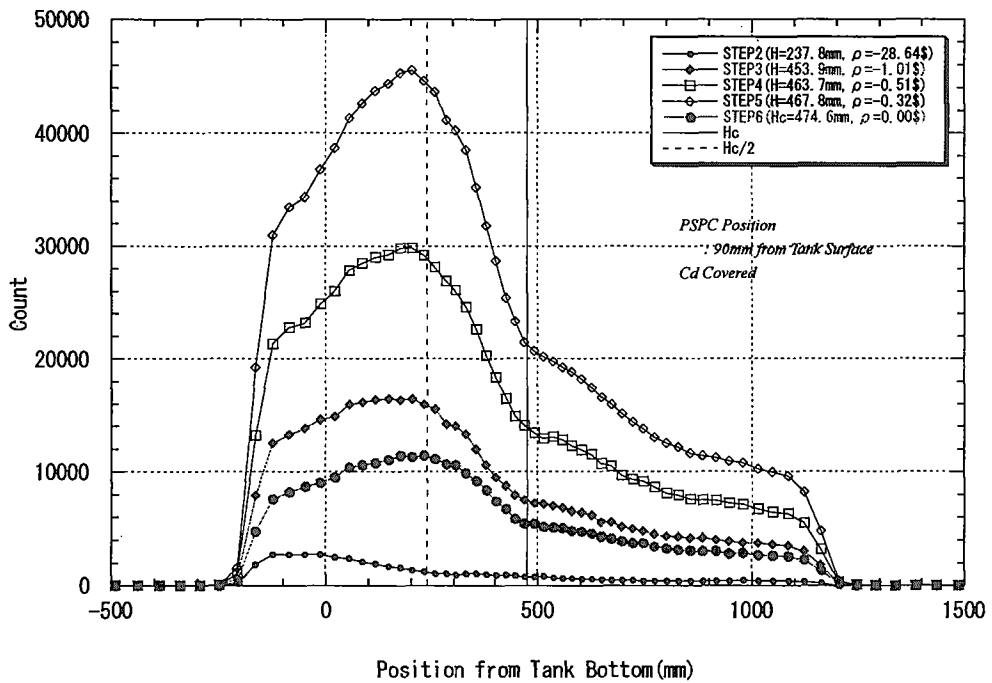


図 3.2.7 中性子束分布 (R383 (裸体系) 高感度検出器)

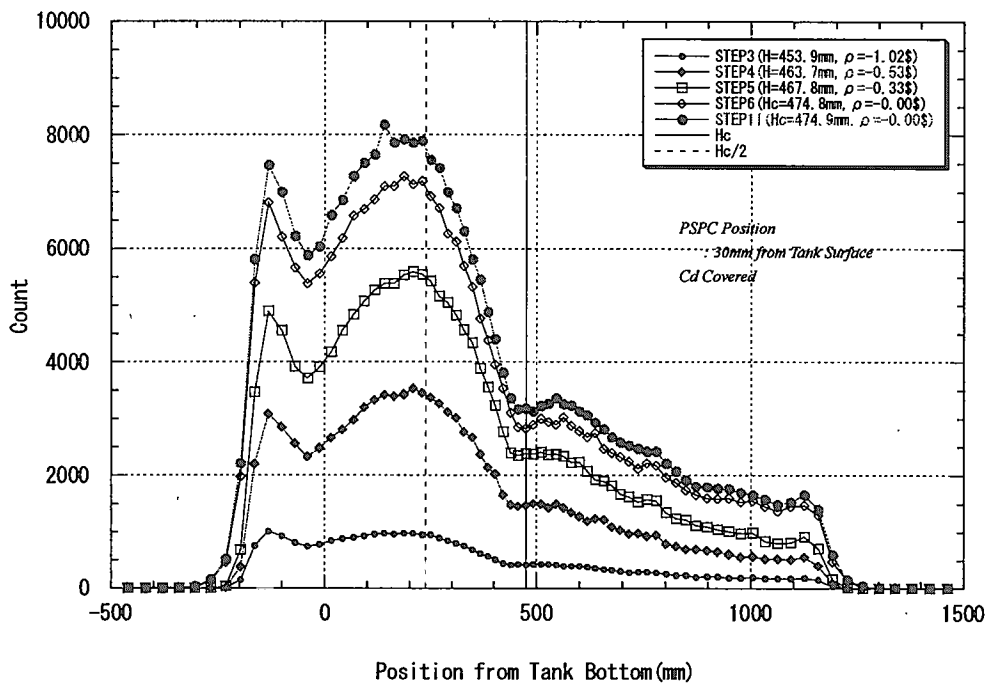


図 3.2.8 中性子束分布 (R384 (裸体系) 低感度検出器)

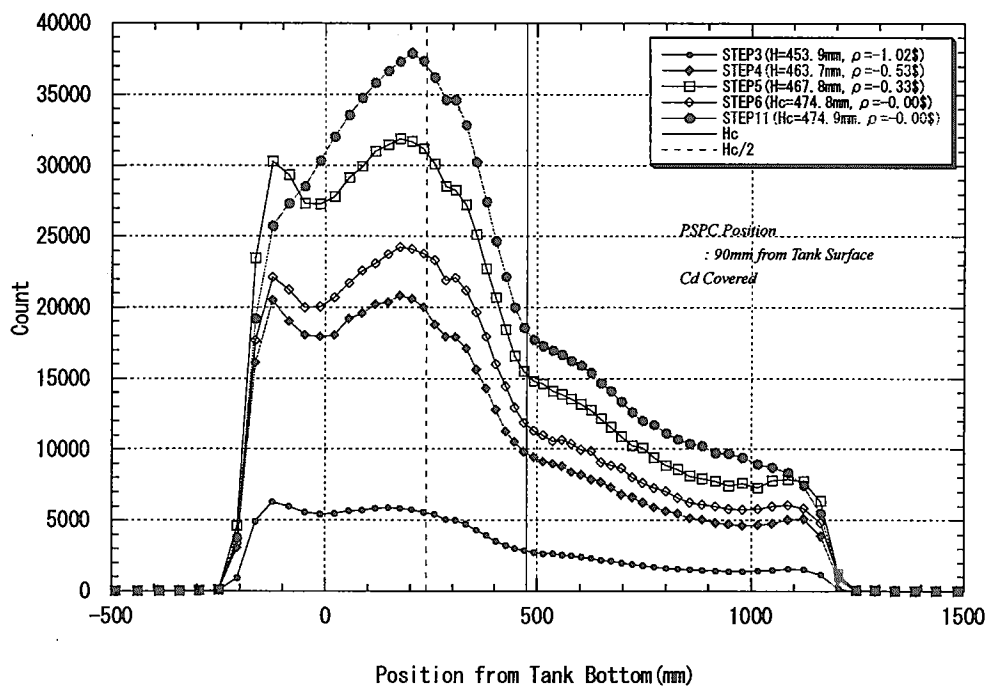


図 3.2.9 中性子束分布 (R384 (裸体系) 高感度検出器)

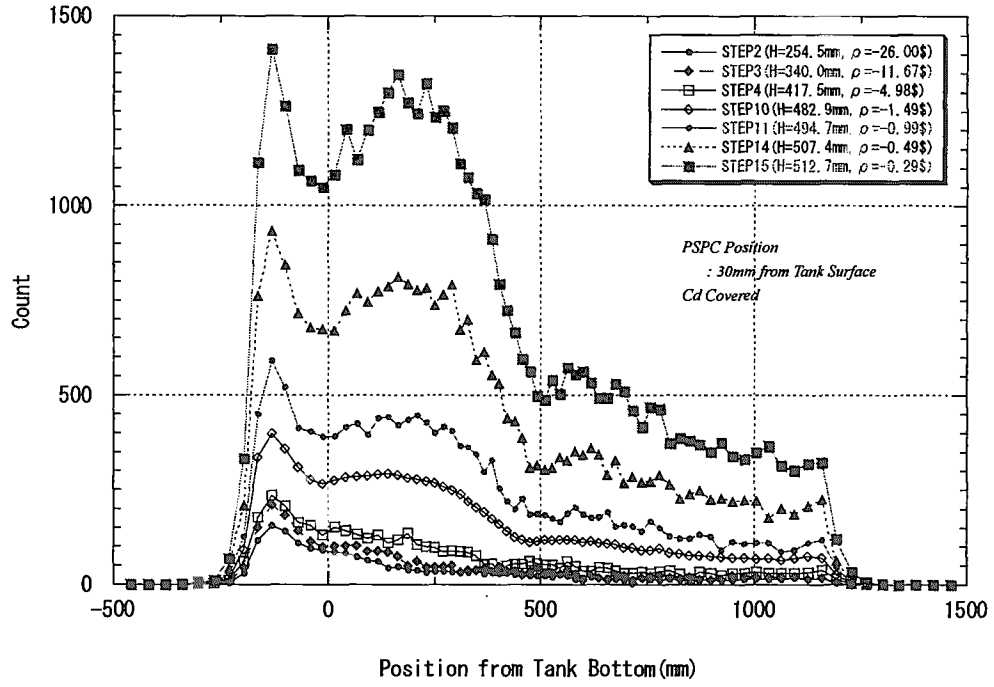


図 3.2.10 中性子束分布 (R385 (裸体系) 低感度検出器)

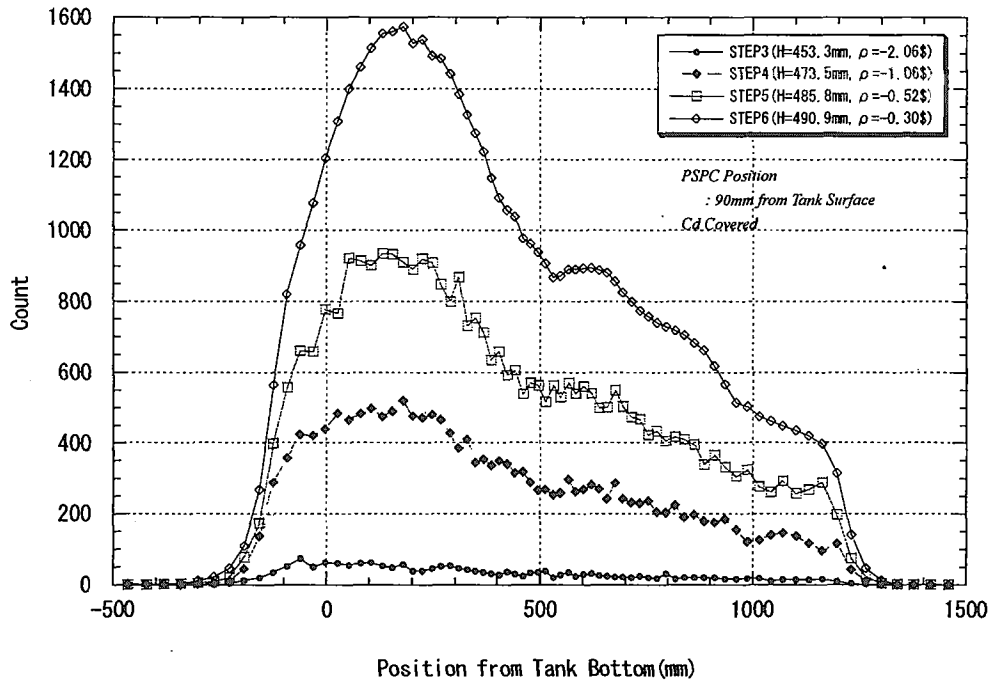


図 3.2.11 中性子束分布 (R386 (水反射体系) 低感度検出器)

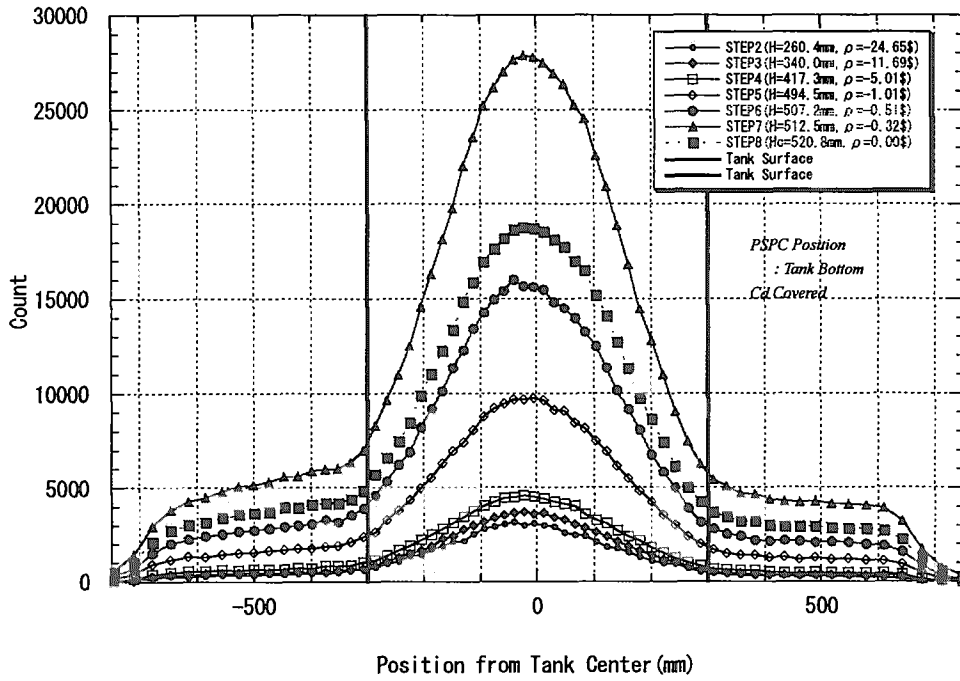


图 3.2.12 中性子束分布 (R387 (裸体系) 低感度検出器)

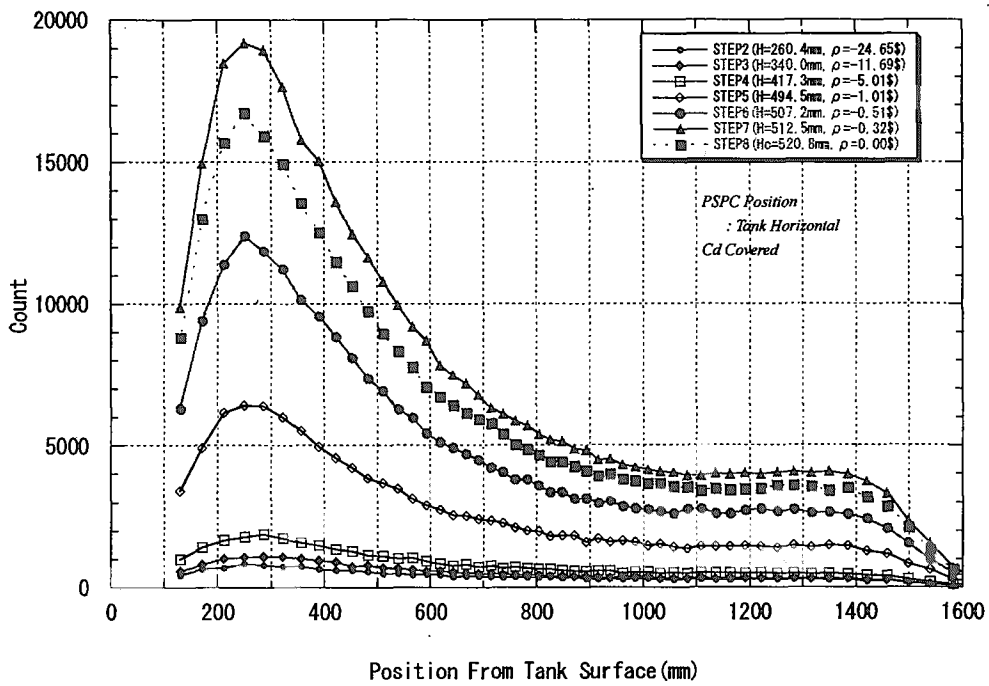


图 3.2.13 中性子束分布 (R387 (裸体系) 高感度検出器)

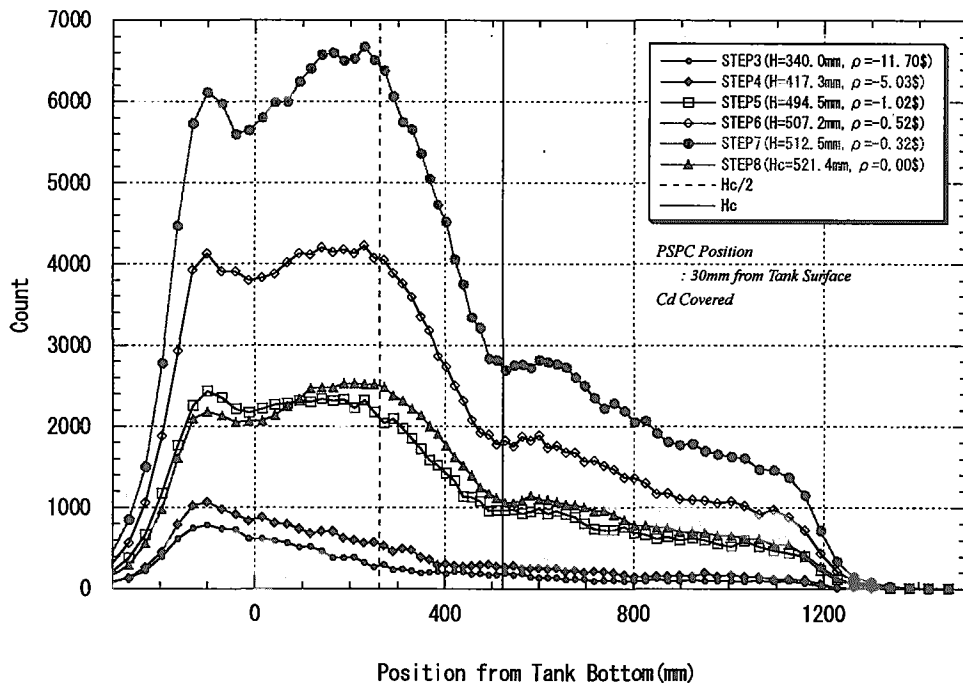


図 3.2.14 中性子束分布 (R388 (裸体系) 低感度検出器)

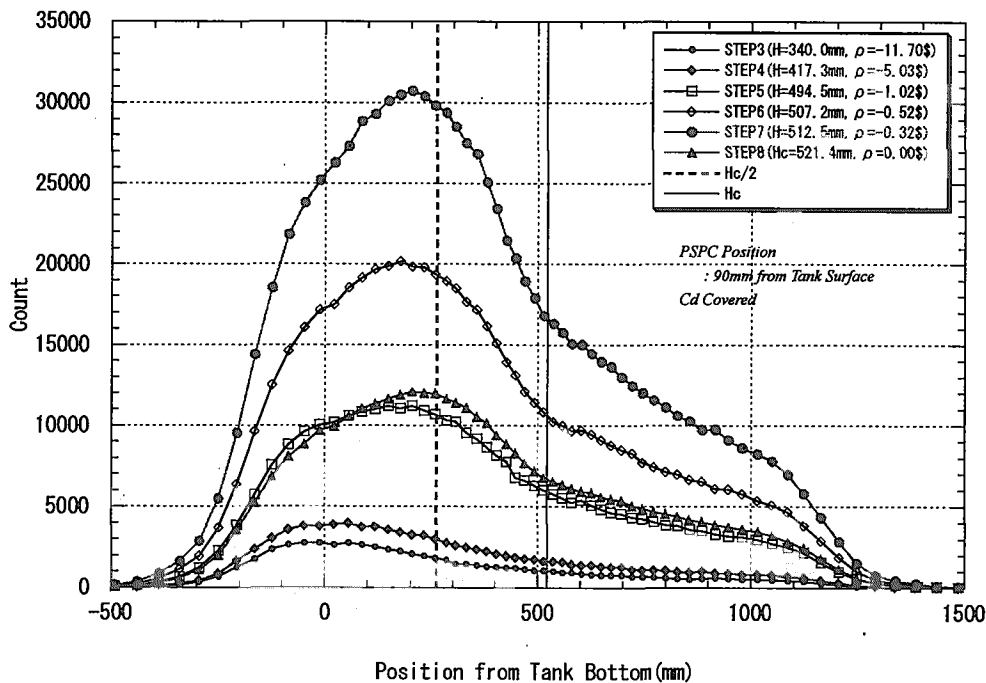


図 3.2.15 中性子束分布 (R388 (裸体系) 高感度検出器)

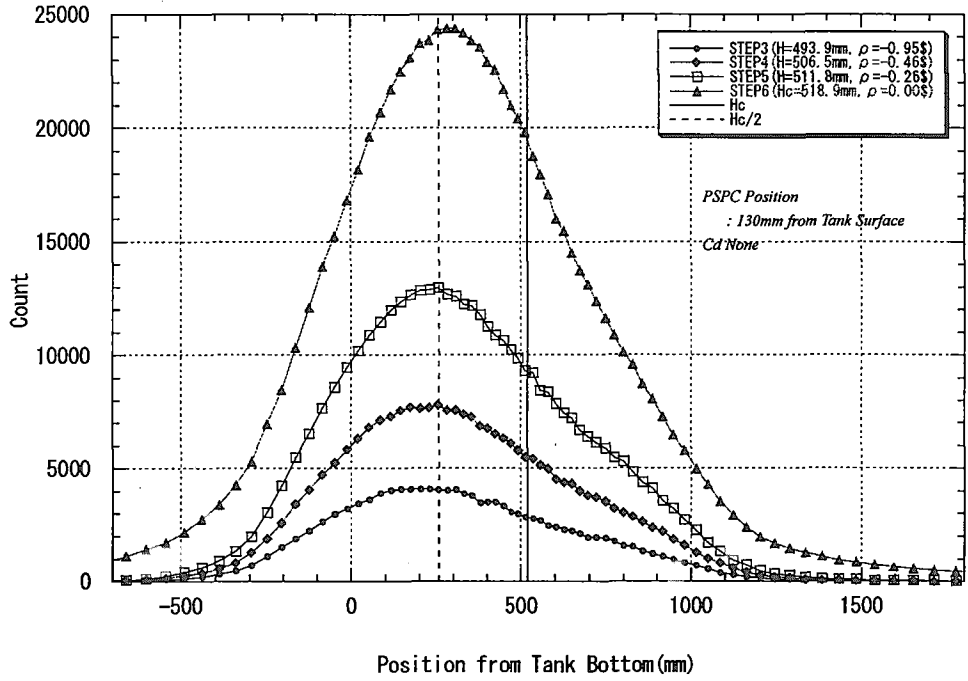


図 3.2.16 中性子束分布 (R389 (裸体系、溶液温度 25°C) 高感度検出器)

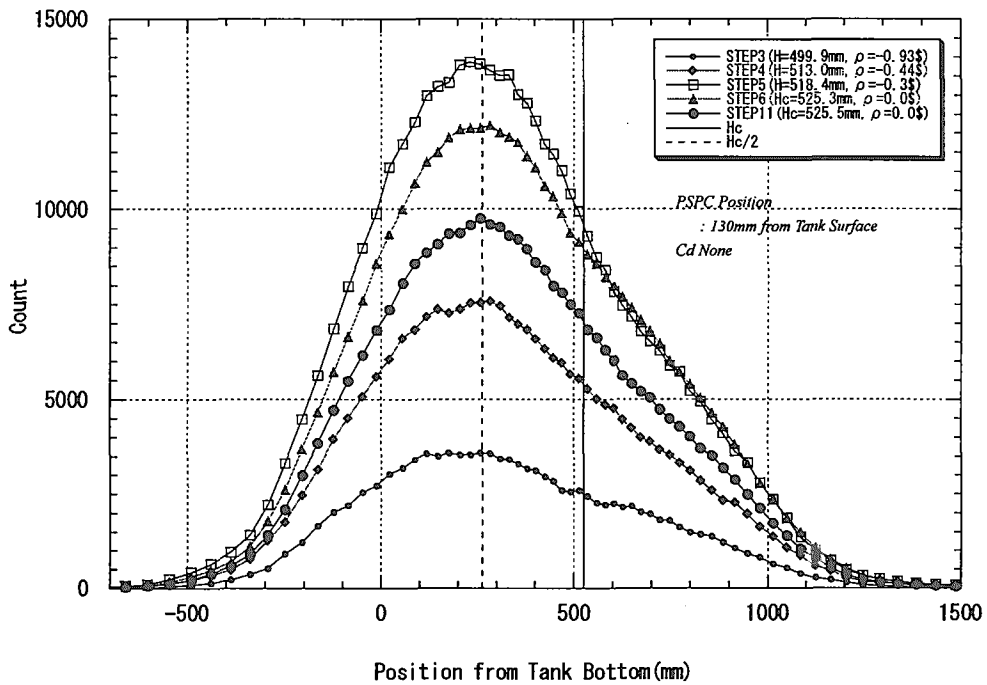


図 3.2.17 中性子束分布 (R390 (裸体系、溶液温度 35°C) 高感度検出器)

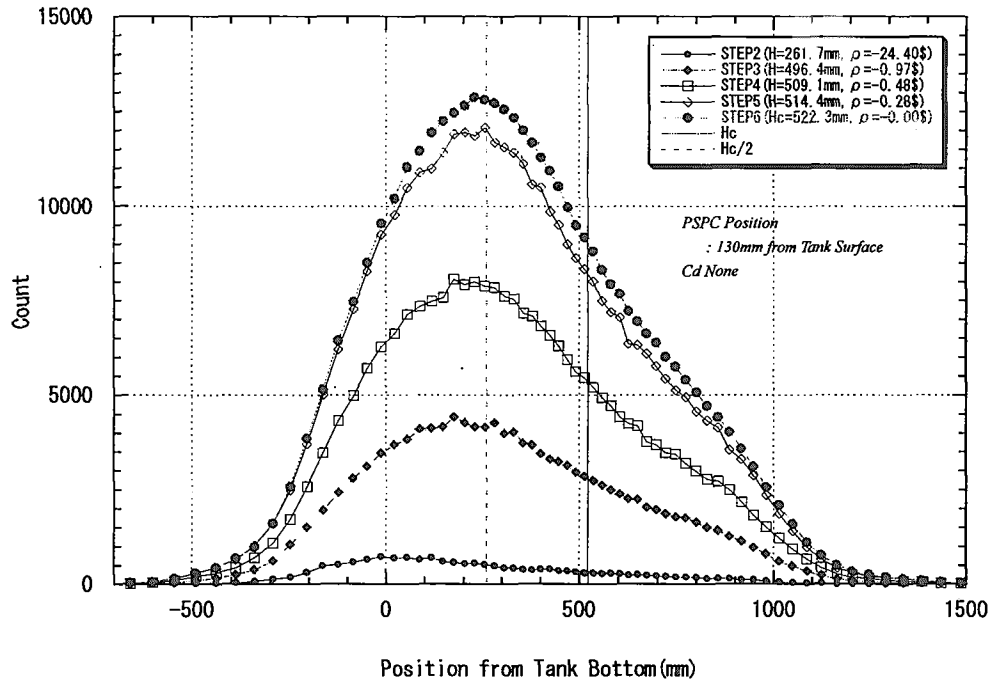


図 3.2.18 中性子束分布 (R391 (裸体系、溶液温度 30°C) 高感度検出器)

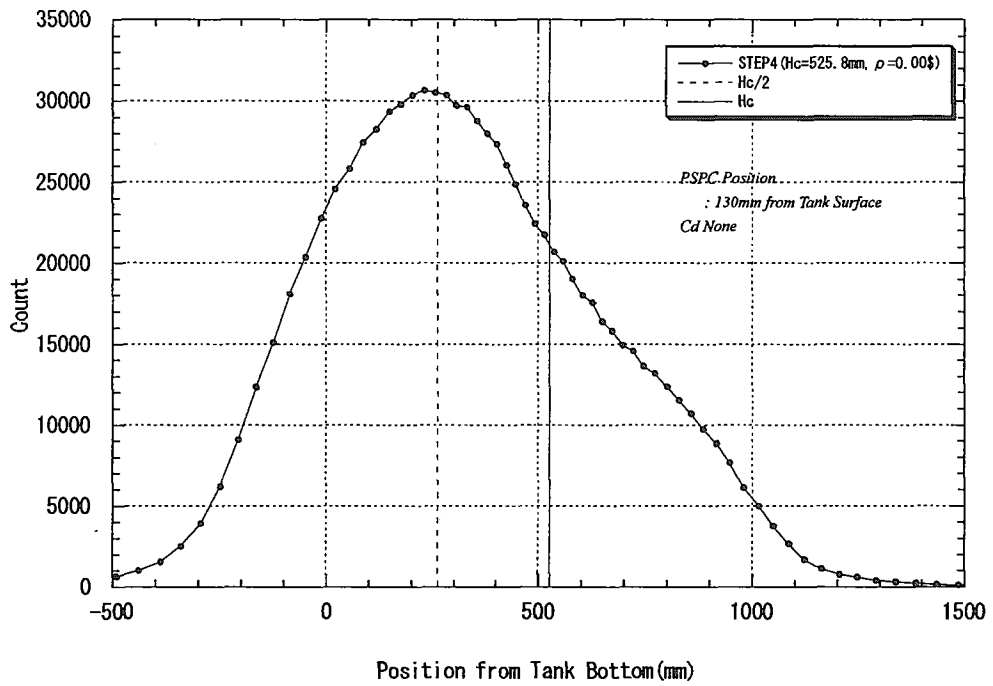


図 3.2.19 中性子束分布 (R392 (裸体系、溶液温度 35°C) 高感度検出器)

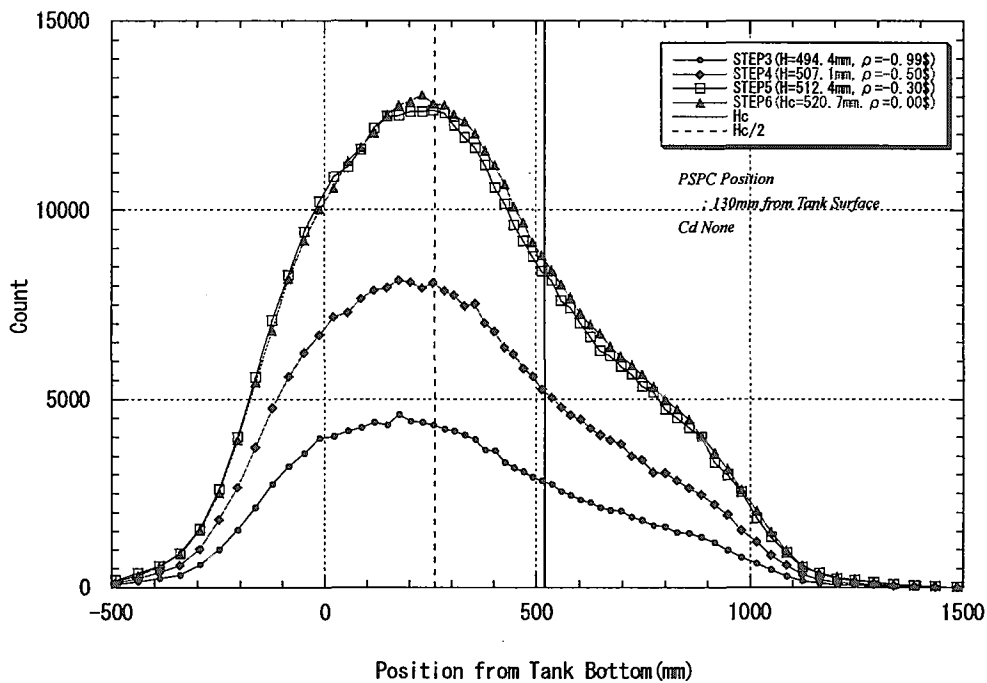


図 3.2.20 中性子束分布 (R393 (裸体系、溶液温度 27°C) 高感度検出器)

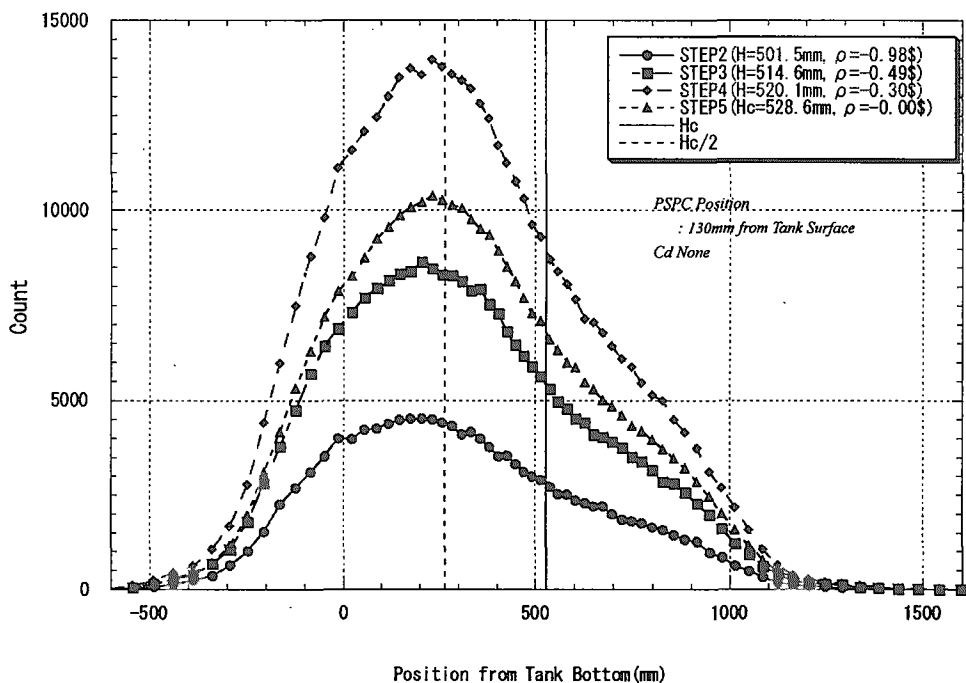


図 3.2.21 中性子束分布 (R394 (裸体系、溶液温度 40°C) 高感度検出器)

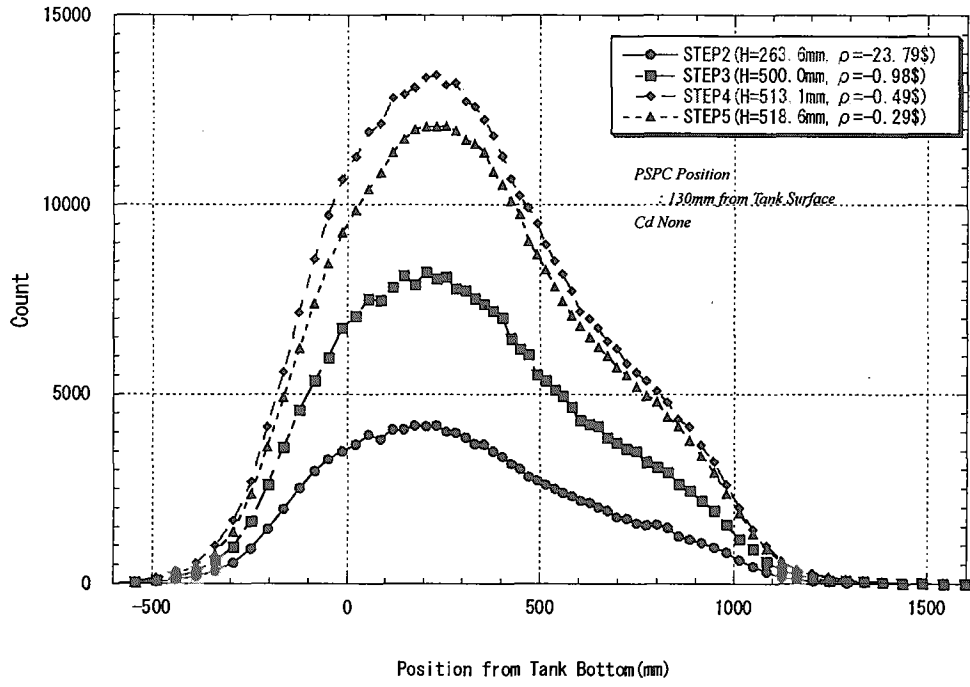


图 3.2.22 中性子束分布 (R396 (裸体系、溶液温度 37°C) 高感度検出器)

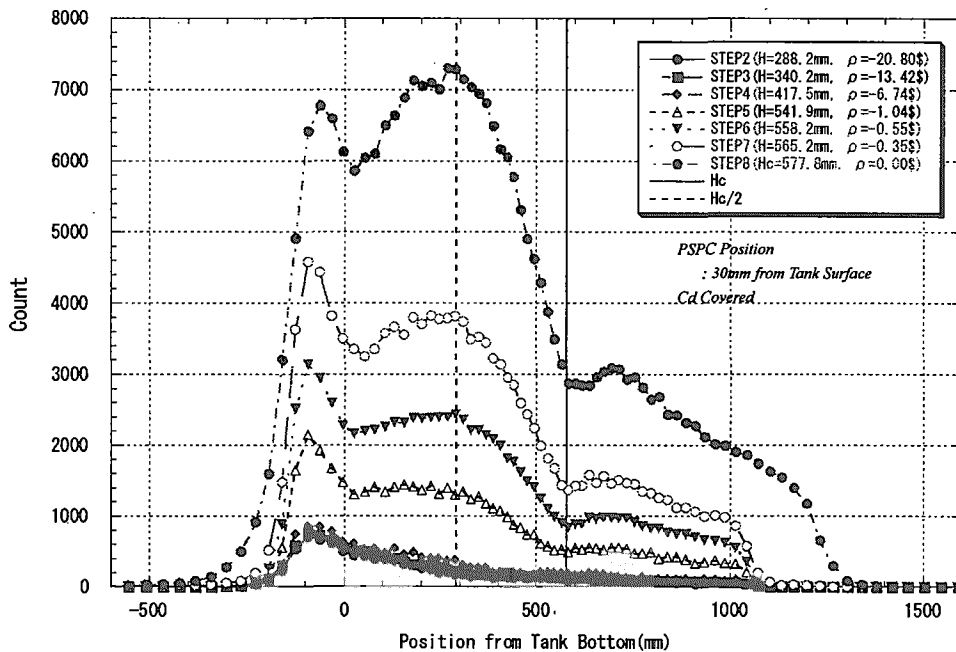


图 3.2.23 中性子束分布 (R397 (裸体系) 低感度検出器)

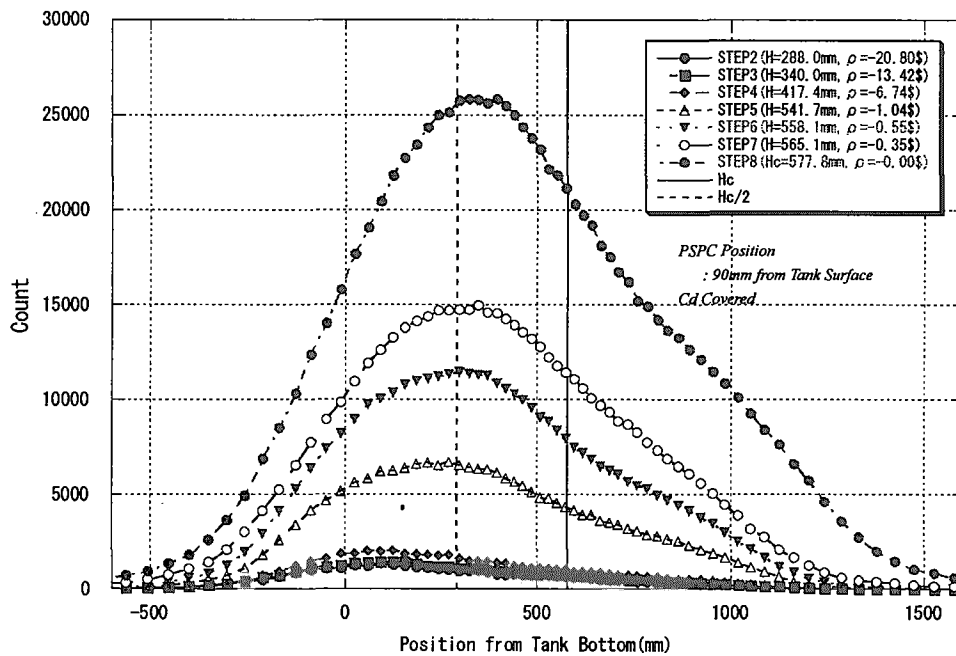


图 3.2.24 中性子束分布 (R397 (裸体系) 高感度検出器)

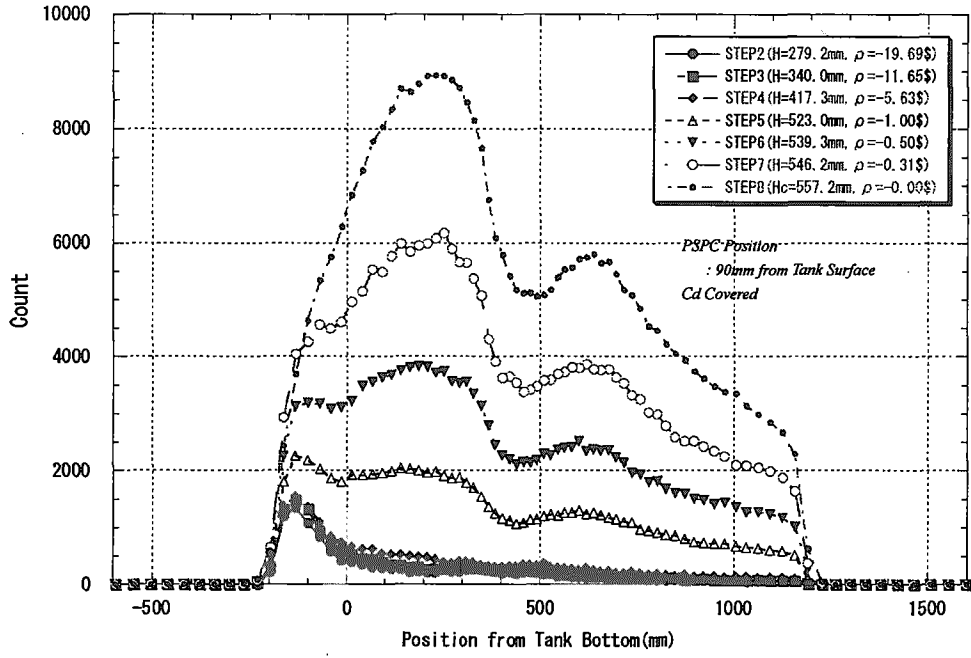


図 3.2.25 中性子束分布 (R398 (水反射体系) 低感度検出器)

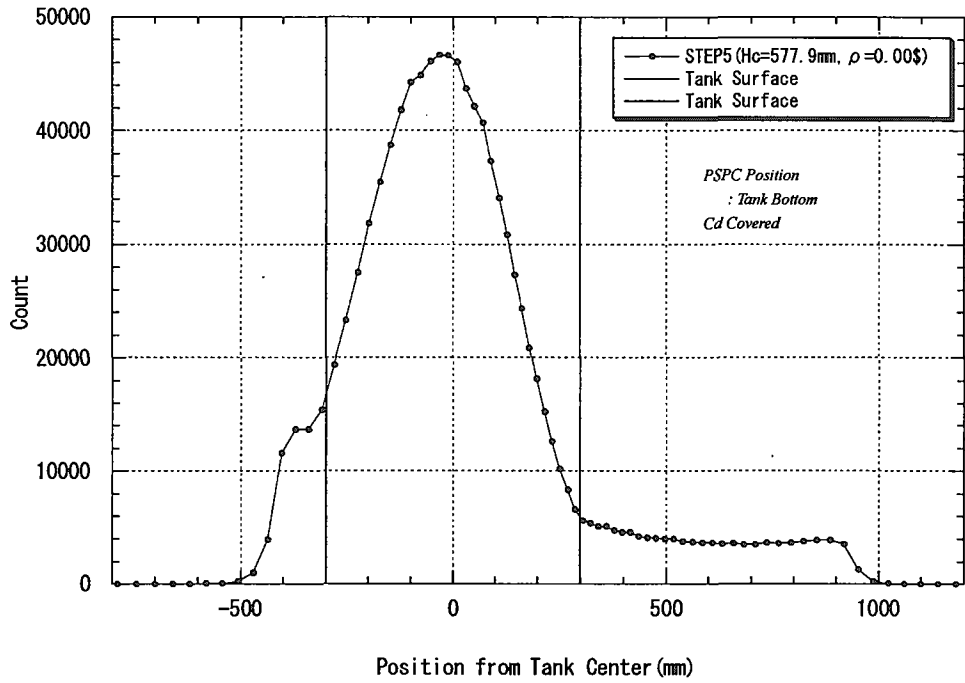


図 3.2.26 中性子束分布 (R399 (裸体系) 低感度検出器)

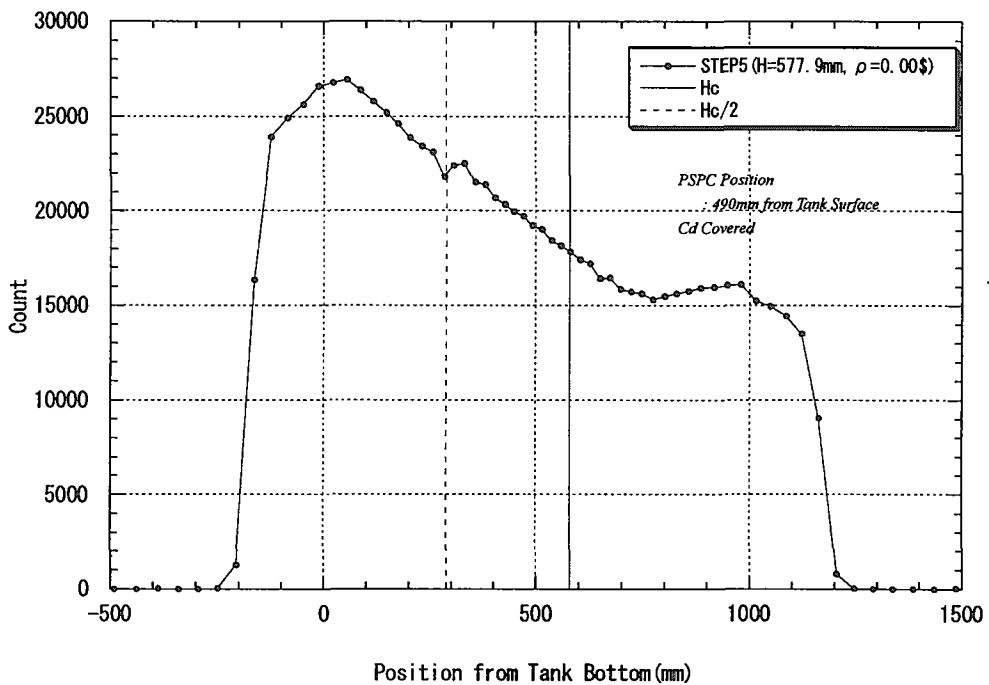


図 3.2.27 中性子束分布 (R399 (裸体系) 高感度検出器)

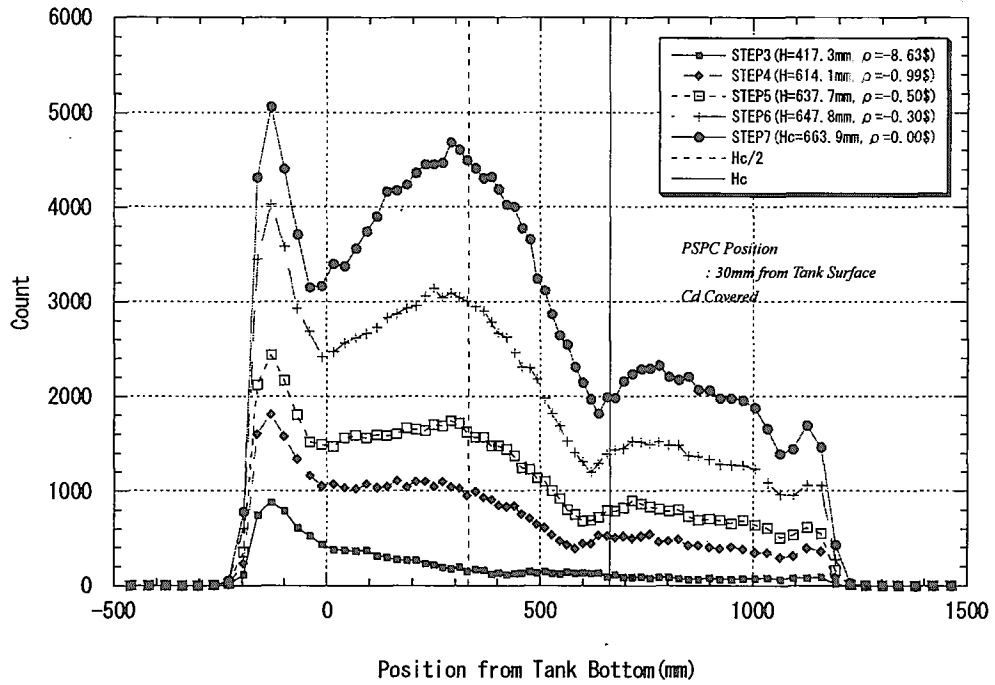


図 3.2.28 中性子束分布 (R400 (裸体系) 低感度検出器)

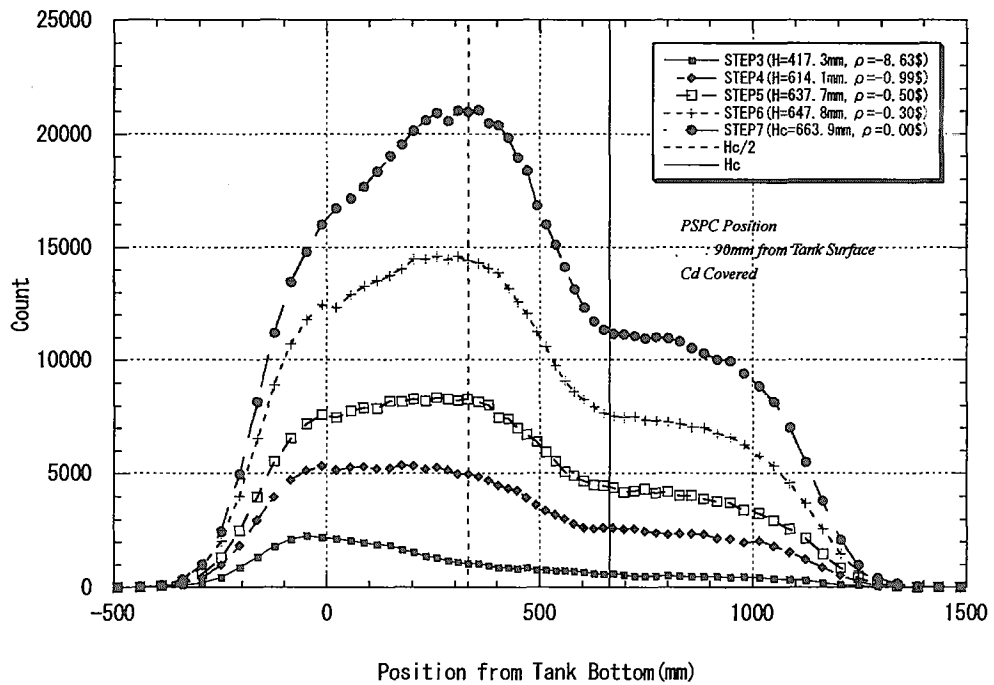


図 3.2.29 中性子束分布 (R400 (裸体系) 高感度検出器)

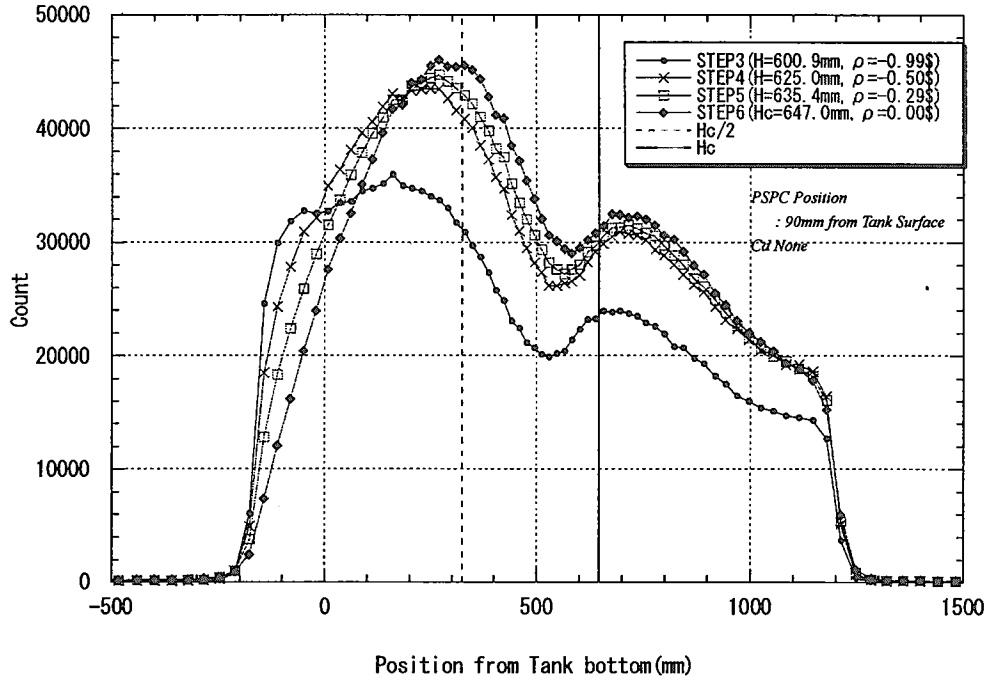


図 3.2.30 中性子束分布 (R401 (水反射系) 低感度検出器)

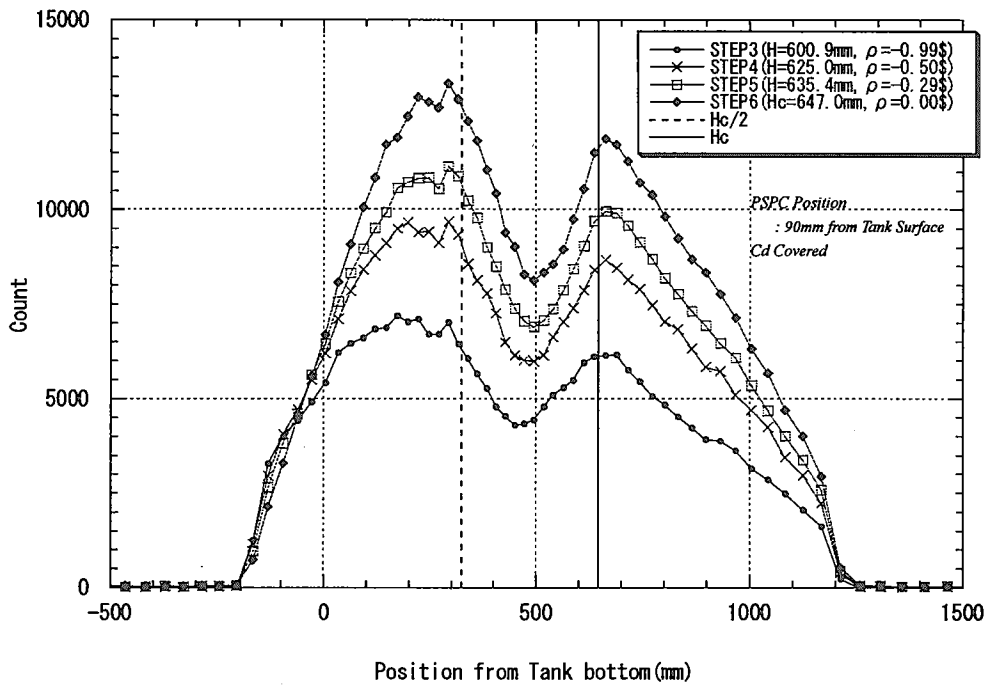


図 3.2.31 中性子束分布 (R401 (水反射系) 高感度検出器)

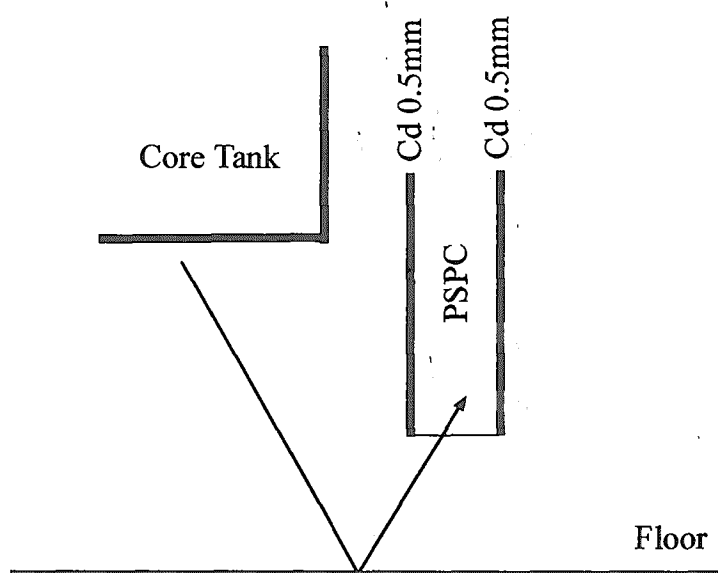


図 3.2.32 中性子束分布を乱す熱中性子の入射

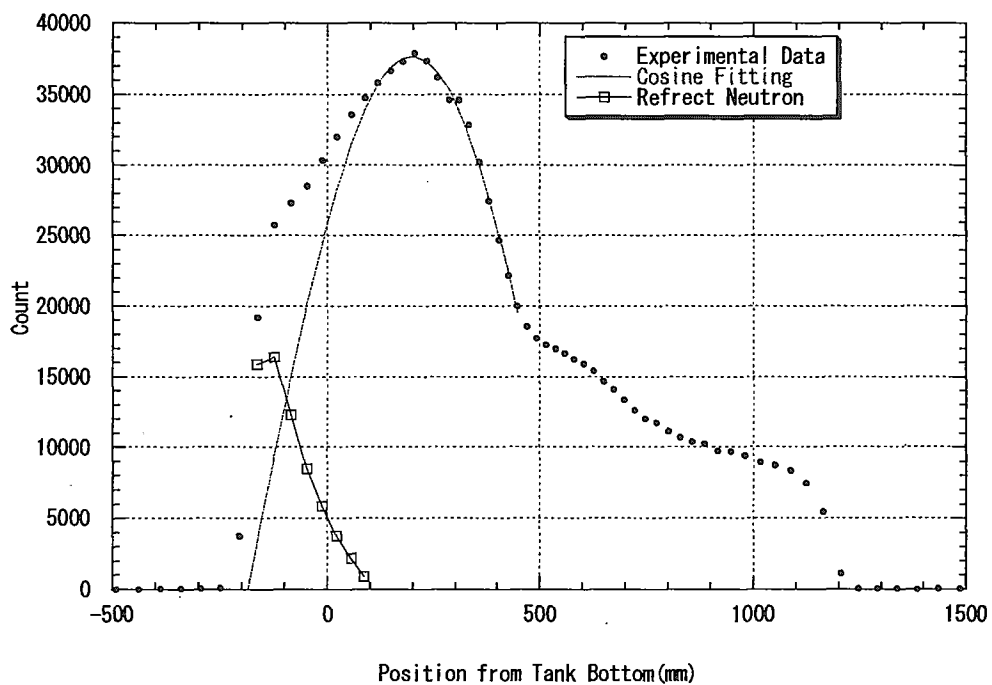


図 3.2.33 Run384 (裸体系) 臨界時 中性子束分布のピーク部分において、臨界液位の半分の高さ以上のデータのみを使用してコサインフィッティングした図 (高感度検出器)

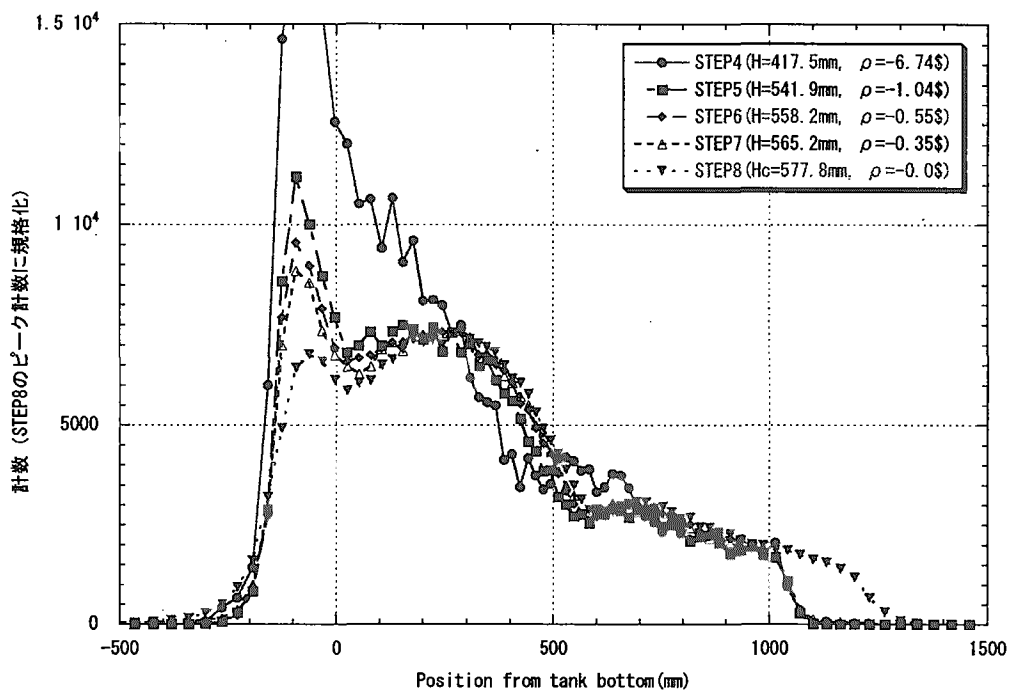


図 3.2.34 臨界時 (STEP8) のピーク計数に規格化した裸体系における低感度検出器の測定値 (R397)

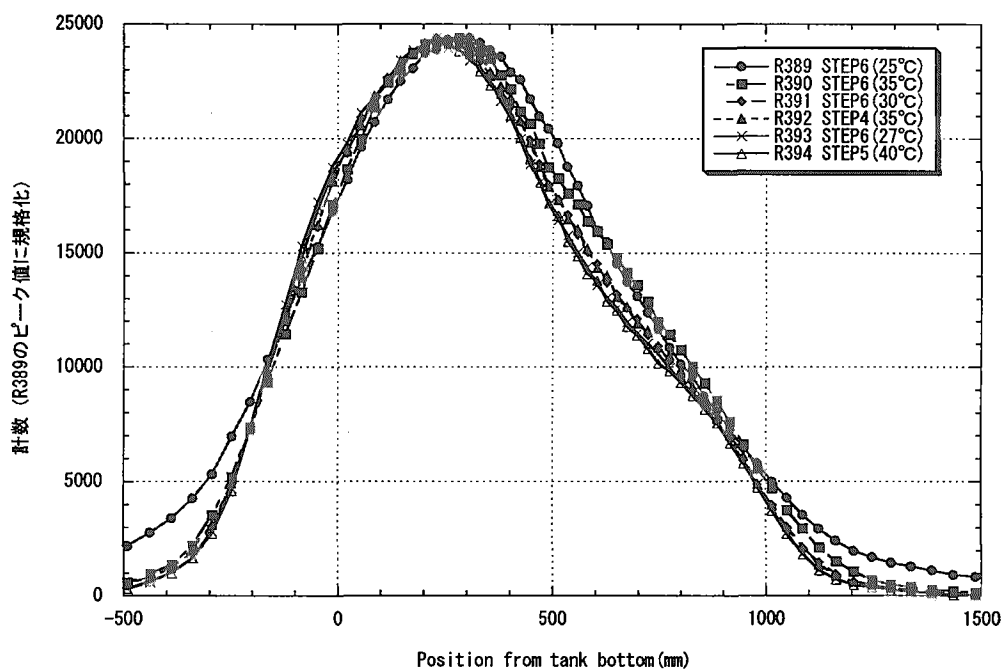


図 3.2.35 R389 の臨界時のピーク計数に規格化した各溶液温度における高感度検出器の測定値

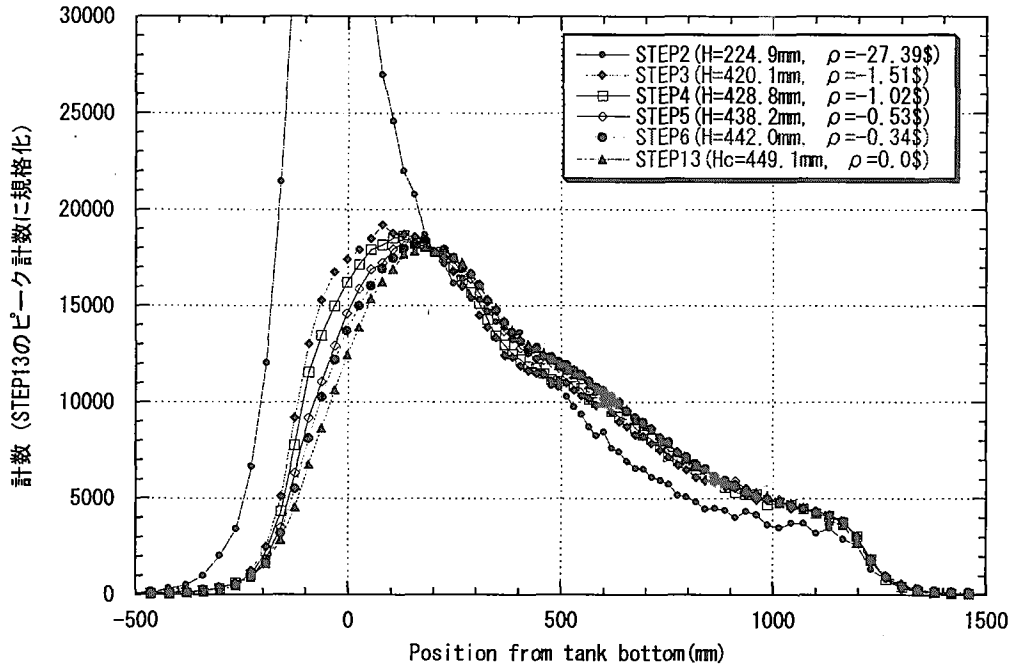


図 3.2.36 臨界時 (STEP13) のピーク計数に規格化した水反射体系における低感度検出器の測定値 (R380)

3.3 パルス中性子実験測定結果

3.3.1 パルス中性子実験での中性子束分布

未臨界状態の非均質炉心についてパルス中性子測定実験を行った。実験に使用したパルス中性子発生装置は図 3.3.1.1 に示すように炉心タンクを挟んで PSPC の反対側に設置した。中性子が発生する ^3H ターゲットの位置は炉心タンクの底面から 240mm の位置である。このパルス中性子発生装置は D-T 反応により 14MeV の中性子 $2\sim 3\times 10^6$ 個を 10μ 秒以内に発生する。実験は STACY を指定の未臨界度 (0.3\$, 0.5\$, 1.0\$, 1.5\$, 3.0\$) にした後、未臨界度に応じて 10pps (1 秒間に 10 パルス) または 20pps (1 秒間に 20 パルス) で 9,000 パルスから 27,000 パルスの中性を発生させ測定を行った。測定結果は中性子束分布の時間変化として表し、図 3.3.1.2~図 3.3.1.21 に示す。

Run400 (裸体系) での低感度検出器で測定した中性子束分布を見ると、中性子の発生数が足りなかったため滑らかな分布が得られなかった。高感度検出器については十分な測定ができたといえる。図から時間毎の中性子束の変化が観察できる。測定した中性子束分布を見るとパルス中性子発生後 2 ミリ秒程度まではパルス中性子発生装置からの中性子によって、分布が炉心タンク底面寄りになっていることがわかる。

Run401 (水反射体系) では低感度検出器にカドミウムを巻かず測定したため、Run400 とはまた違った結果が得られた。パルス中性子発生後 1 ミリ秒後よりも 2 ミリ秒後、または 3 ミリ秒後のほうが中性子束が高いことがわかる。高感度検出器については Run400 と同様に、パルス中性子発生装置から中性子が発生された直後から中性子束が減衰していく様子がわかる。裸体系のときはパルス中性子発生後 2 ミリ秒程度までは分布が炉心タンク底面寄りになっていたが、今回のような水反射体のときはそのような傾向が現れていない。これはパルス中性子発生装置からの中性子が、タンクに入射する前に水中で散乱され、裸体系のときに比べて中性子が炉心タンクに入射する範囲が広がっているためであると考えられる。

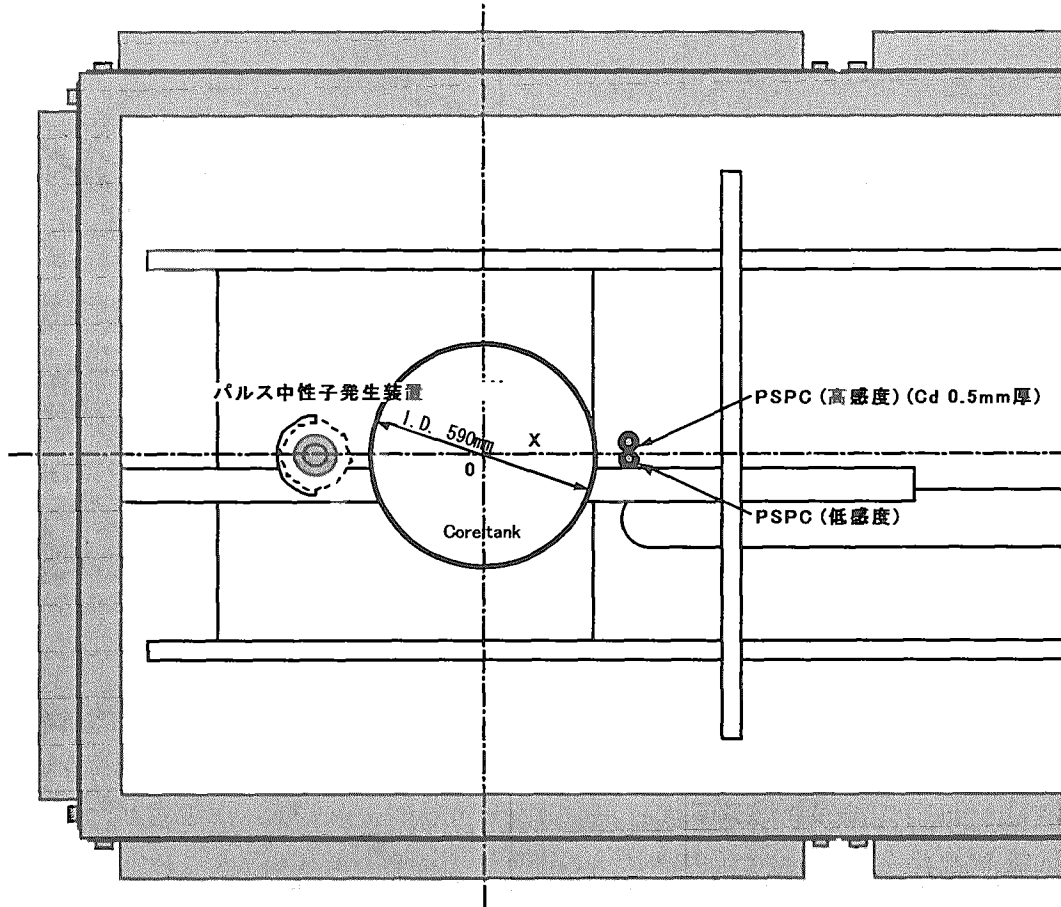


図 3.3.1.1 パルス中性子発生装置設置図

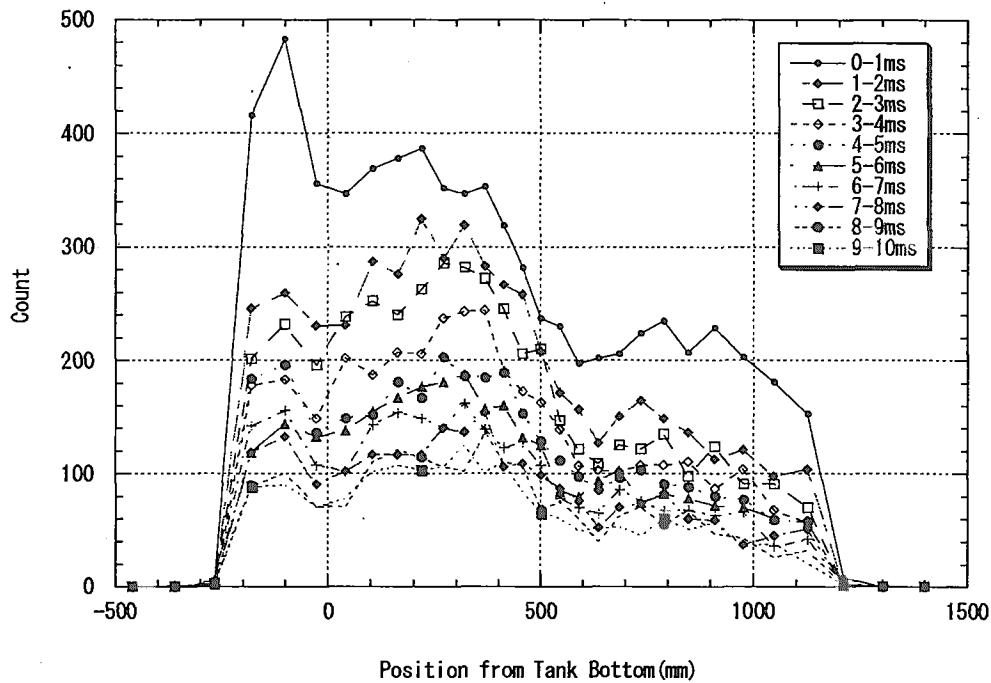


図 3.3.1.2 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-0.30\$ 低感度検出器)

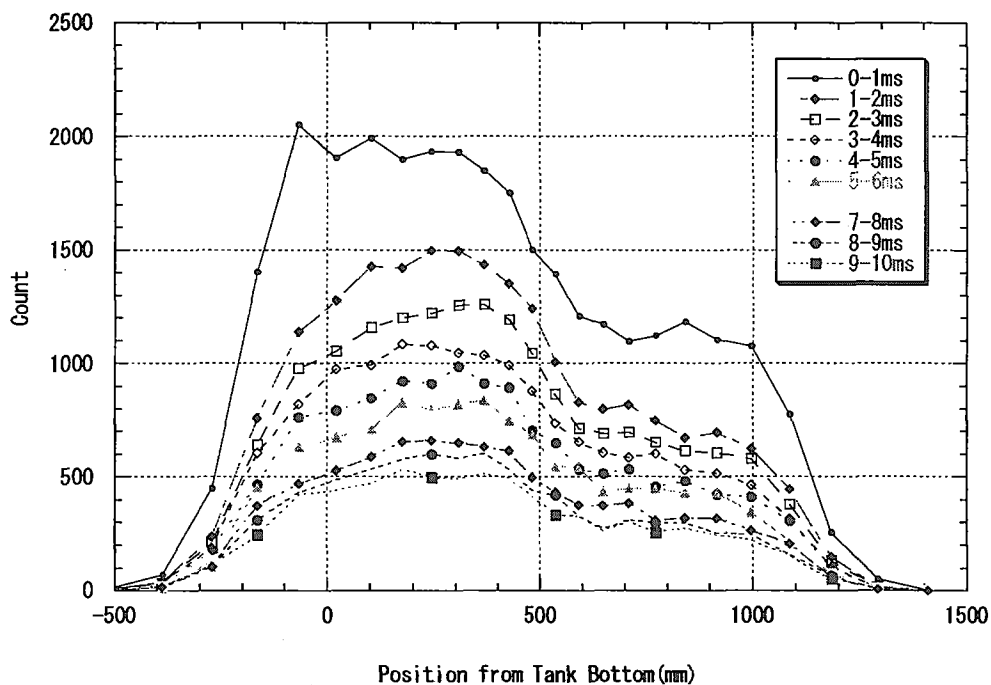


図 3.3.1.3 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-0.30\$ 高感度検出器)

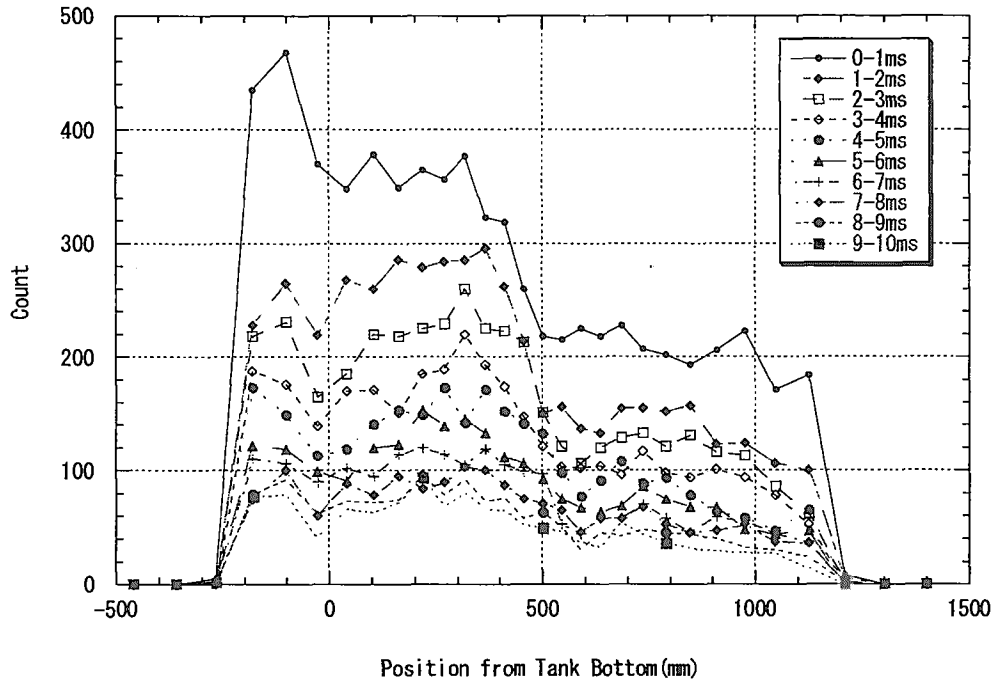


図 3.3.1.4 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-0.51\$ 低感度検出器)

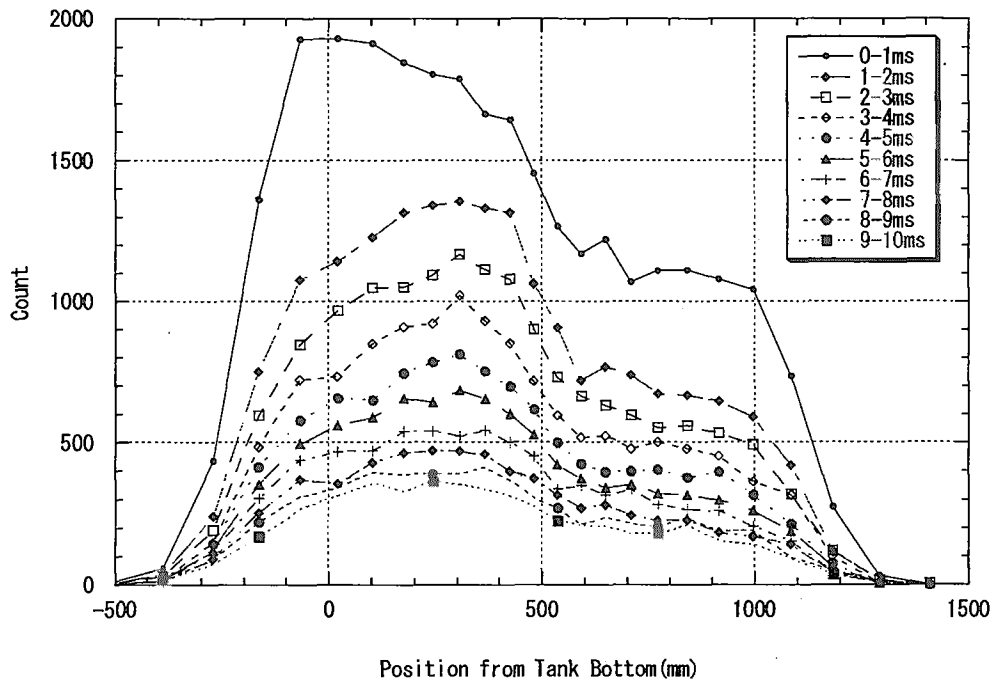


図 3.3.1.5 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-0.51\$ 高感度検出器)

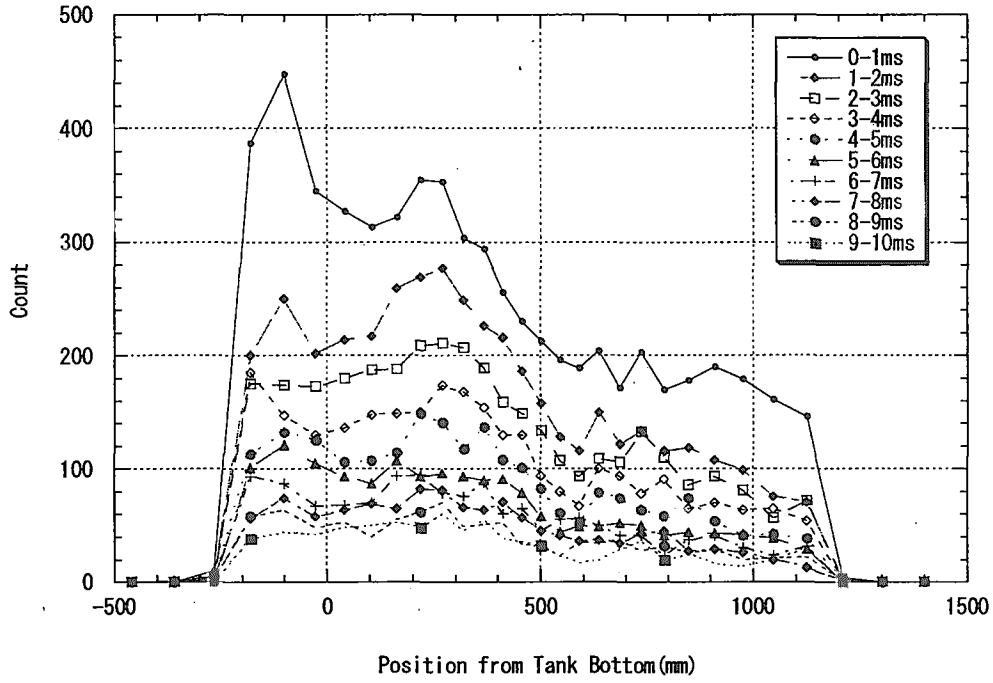


図 3.3.1.6 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-1.00\$ 低感度検出器)

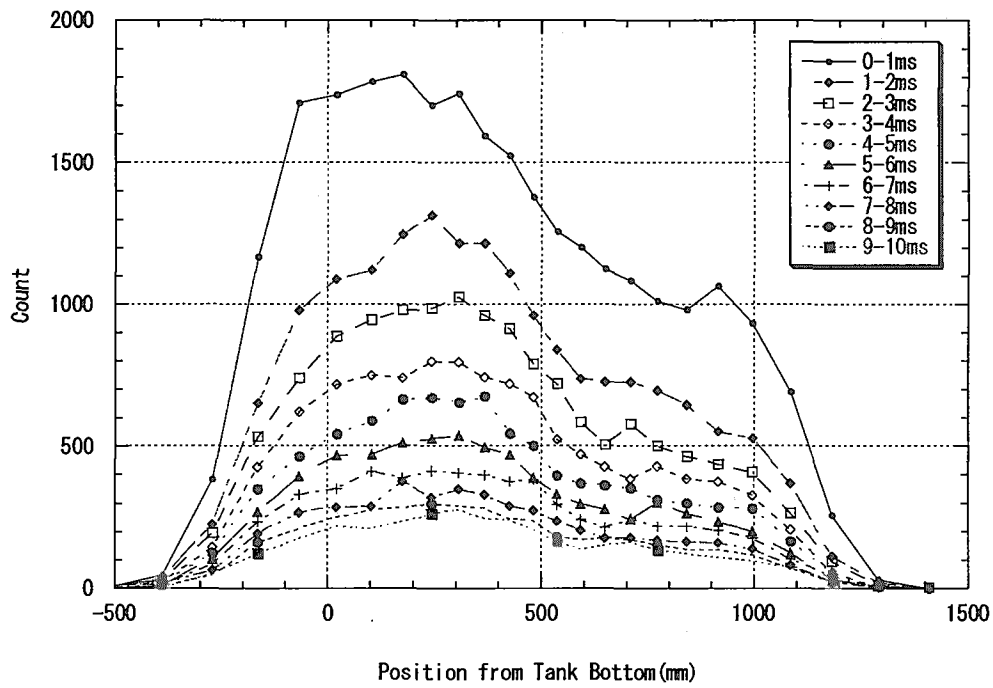


図 3.3.1.7 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-1.00\$ 高感度検出器)

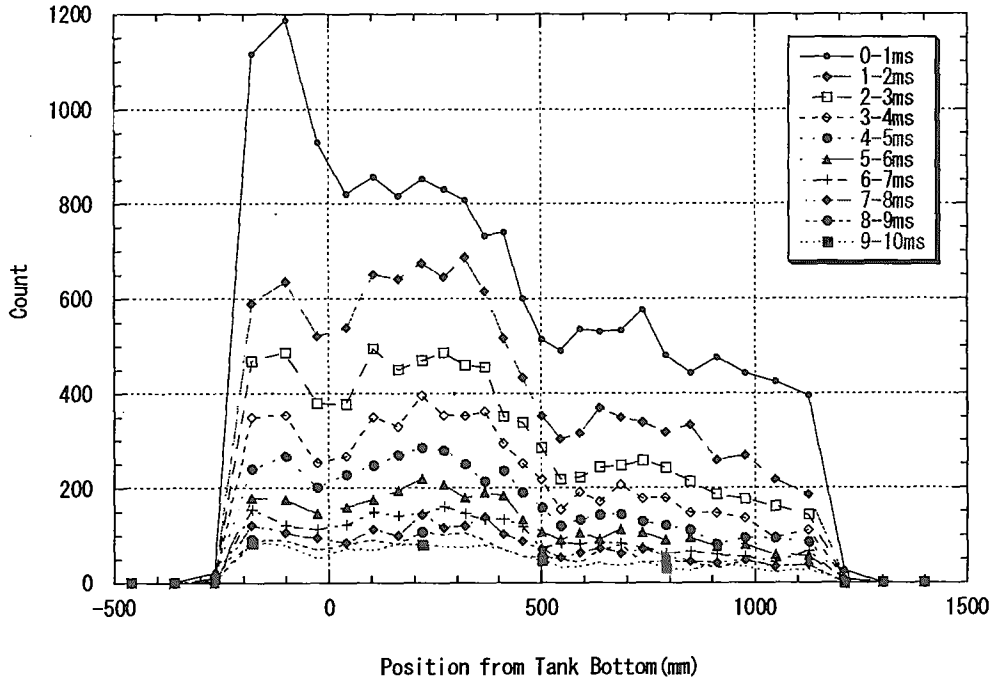


図 3.3.1.8 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-1.49\$ 低感度検出器)

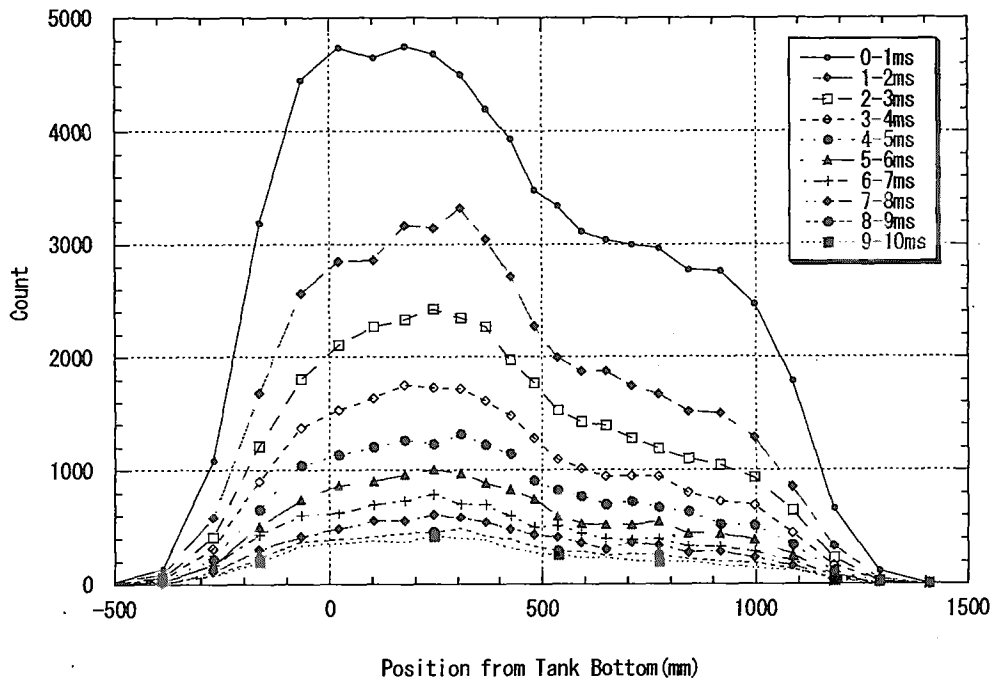


図 3.3.1.9 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-1.49\$ 高感度検出器)

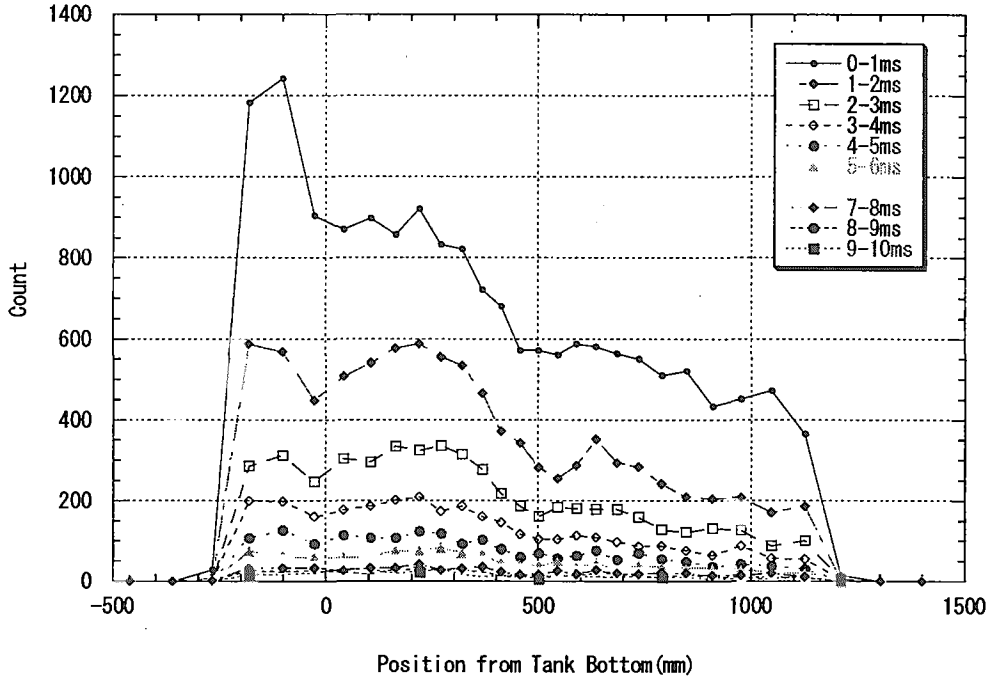


図 3.3.1.10 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-3.03\$ 低感度検出器)

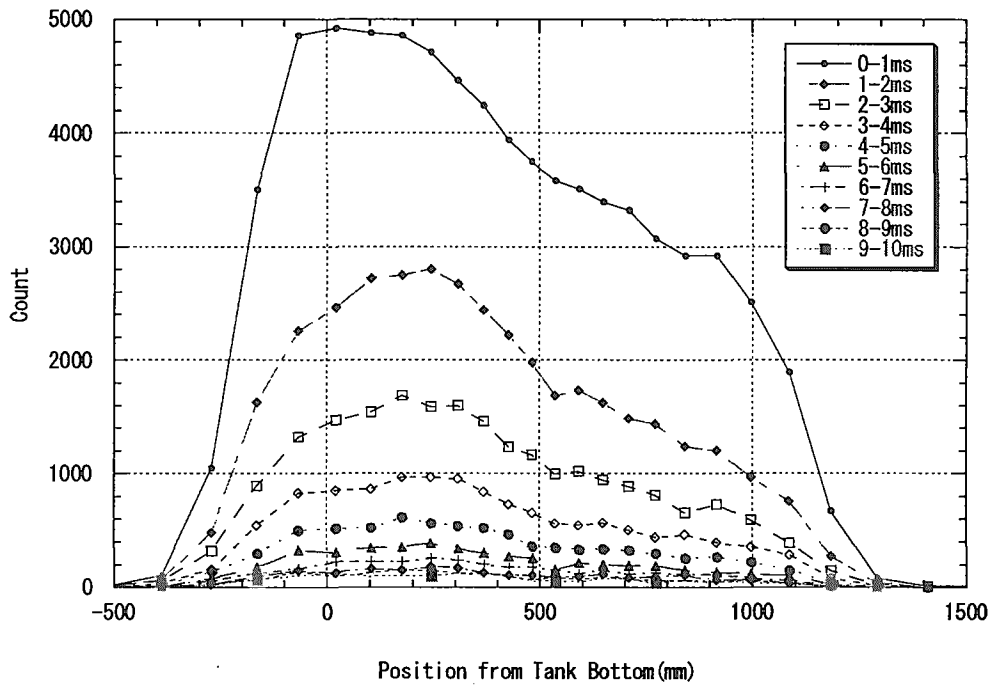


図 3.3.1.11 中性子束分布の時間変化
(Run400 (裸体系) 未臨界度-3.03\$ 高感度検出器)

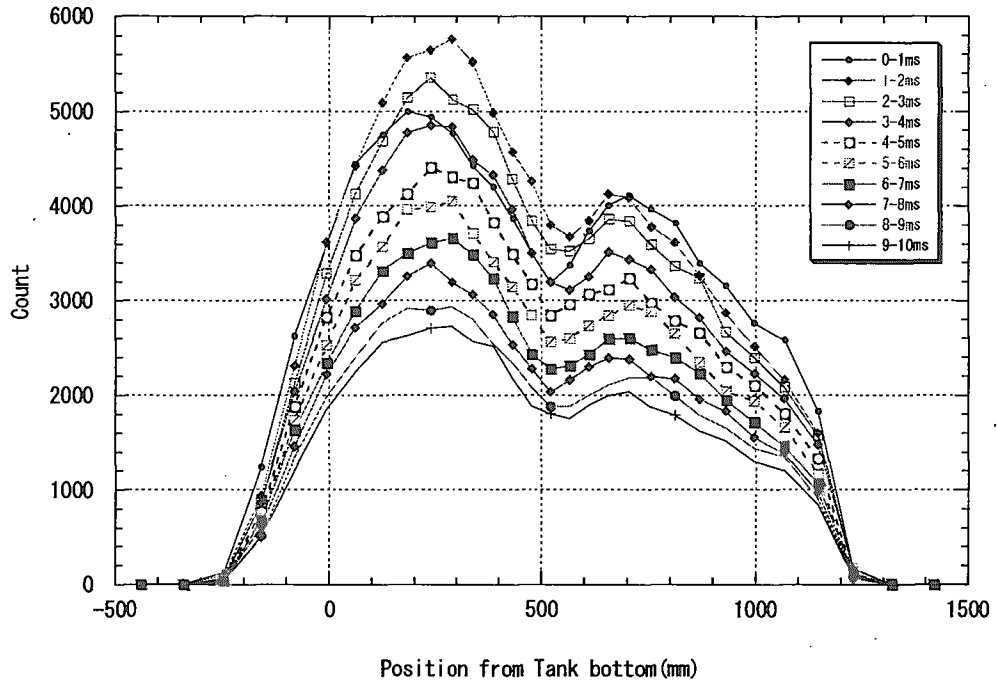


図 3.3.1.12 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-0.29\$ 低感度検出器)

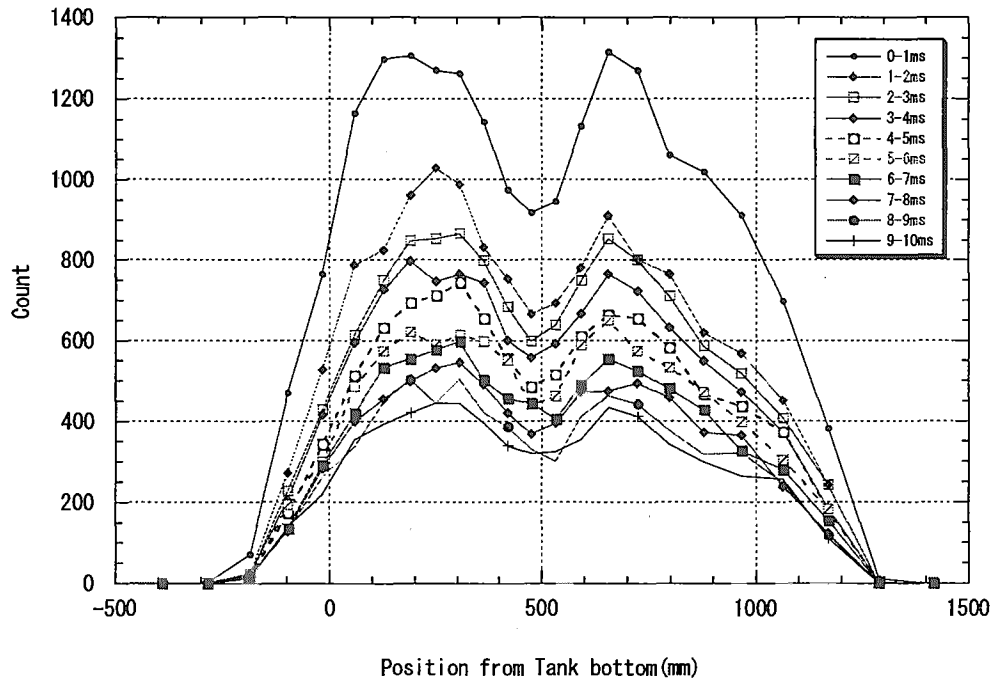


図 3.3.1.13 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-0.29\$ 高感度検出器)

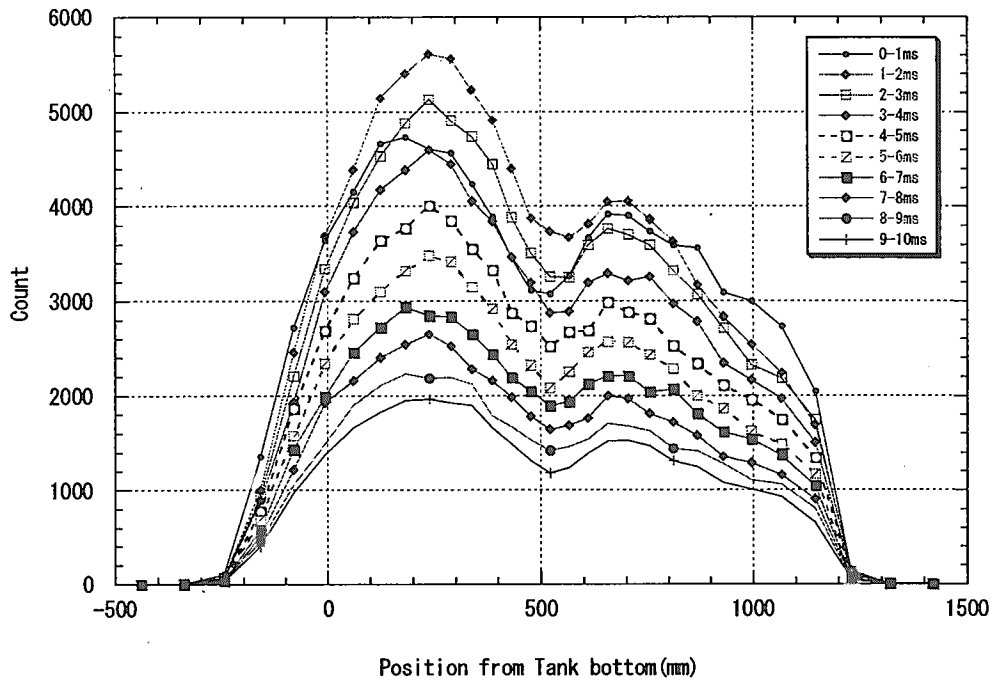


図 3.3.1.14 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-0.49\$ 低感度検出器)

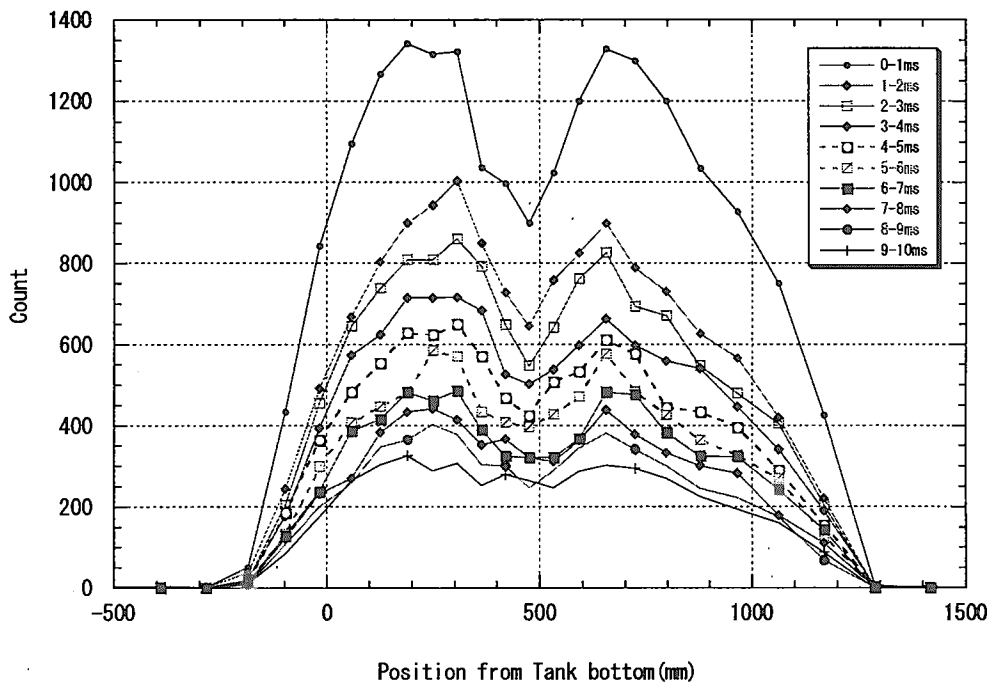


図 3.3.1.15 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-0.49\$ 高感度検出器)

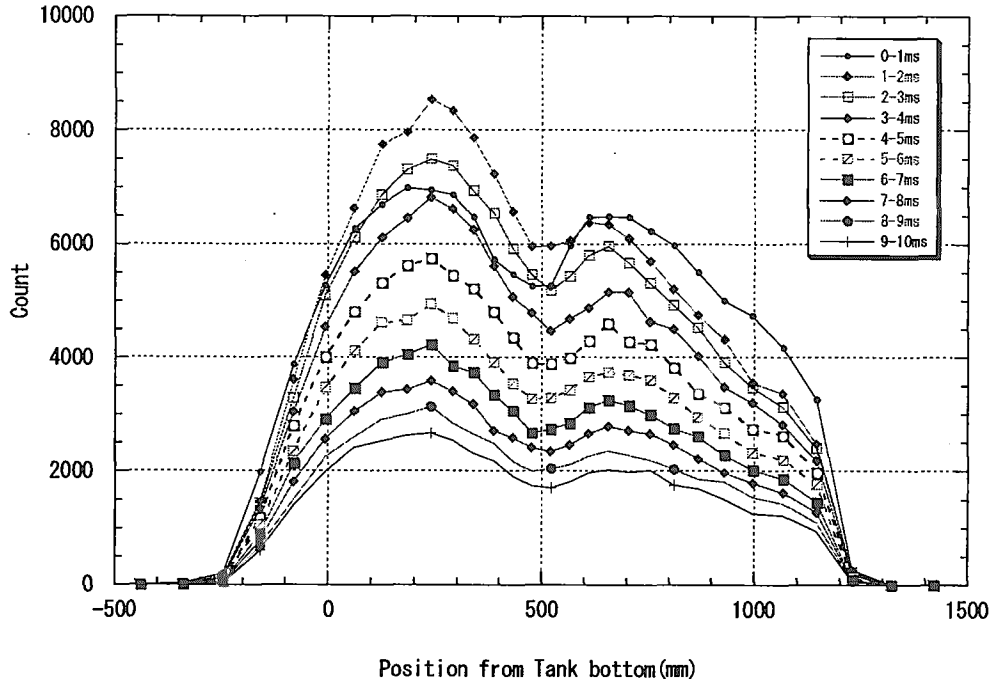


図 3.3.1.16 中性子束分布の時間変化
 (Run401 (水反射体) 未臨界度-0.96\$ 低感度検出器)

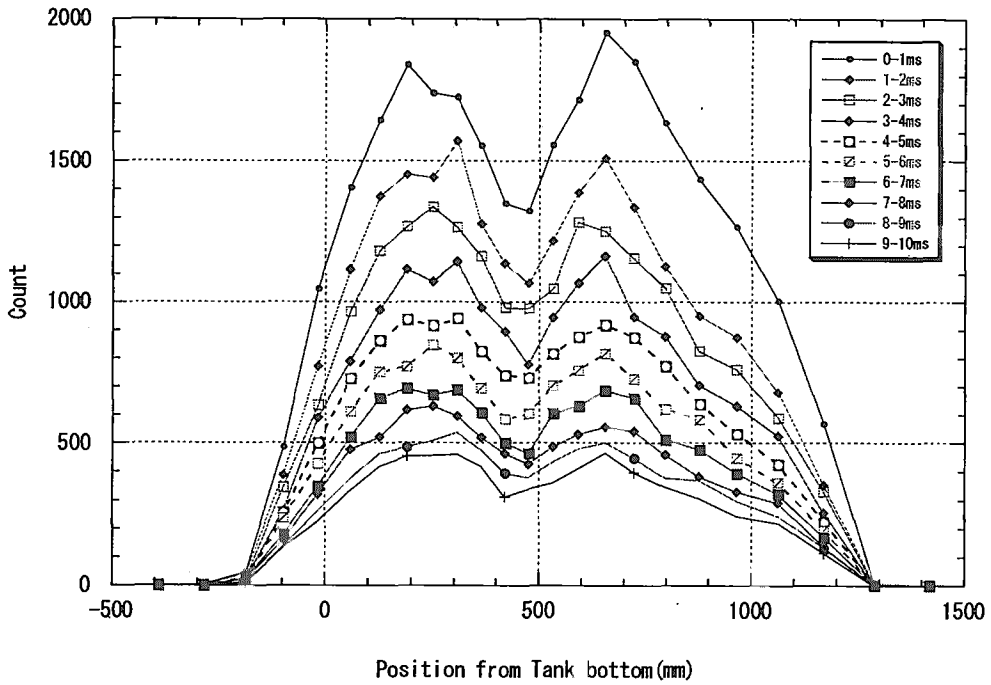


図 3.3.1.17 中性子束分布の時間変化
 (Run401 (水反射体) 未臨界度-0.96\$ 高感度検出器)

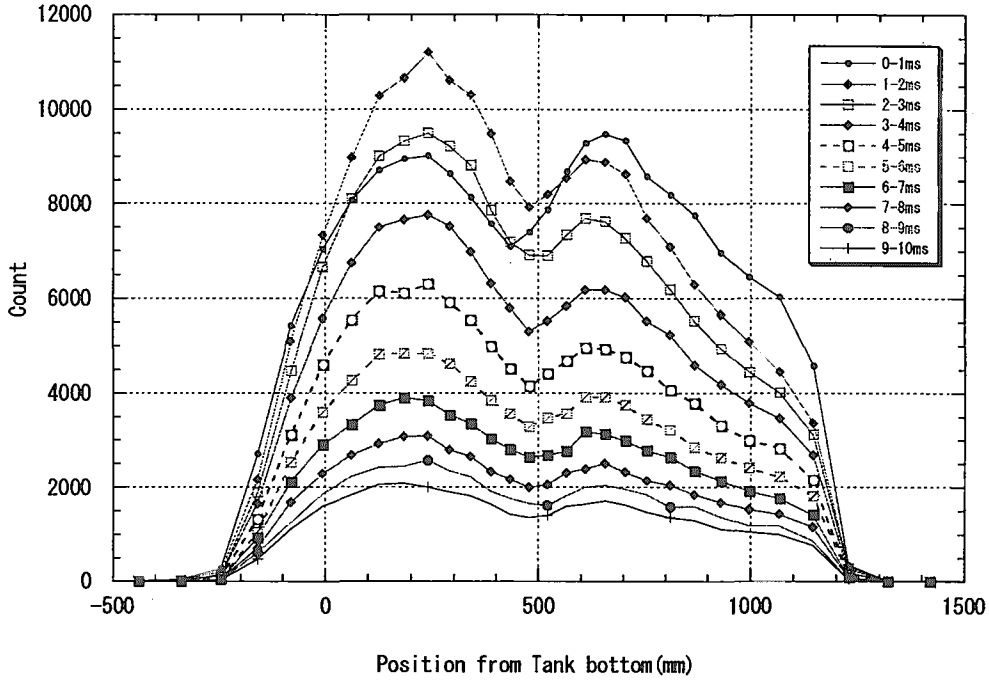


図 3.3.1.18 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-1.45\$ 低感度検出器)

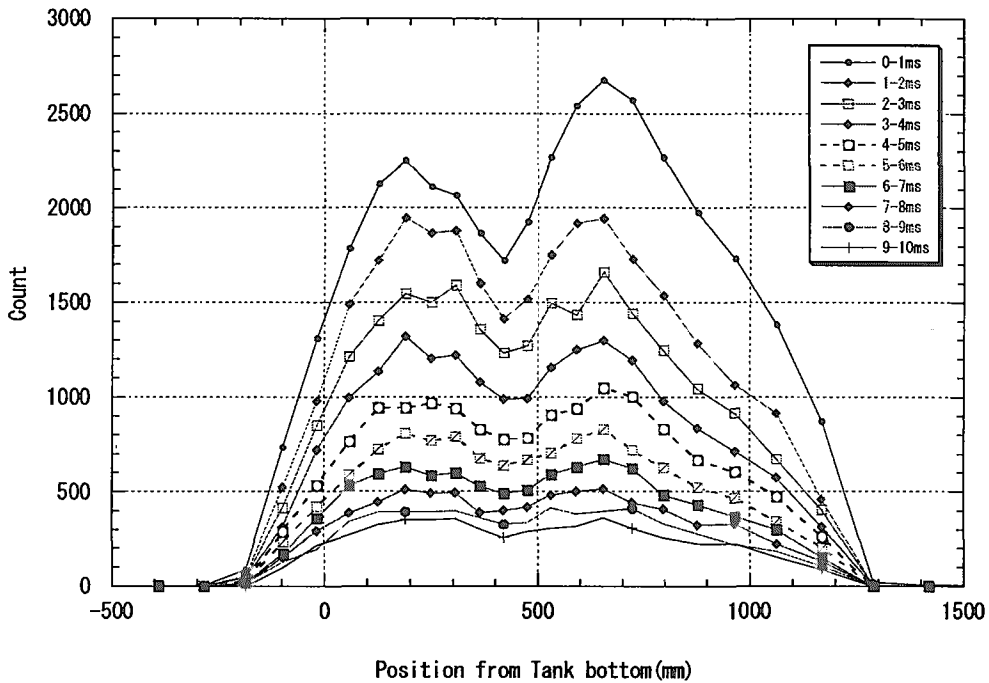


図 3.3.1.19 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-1.45\$ 高感度検出器)

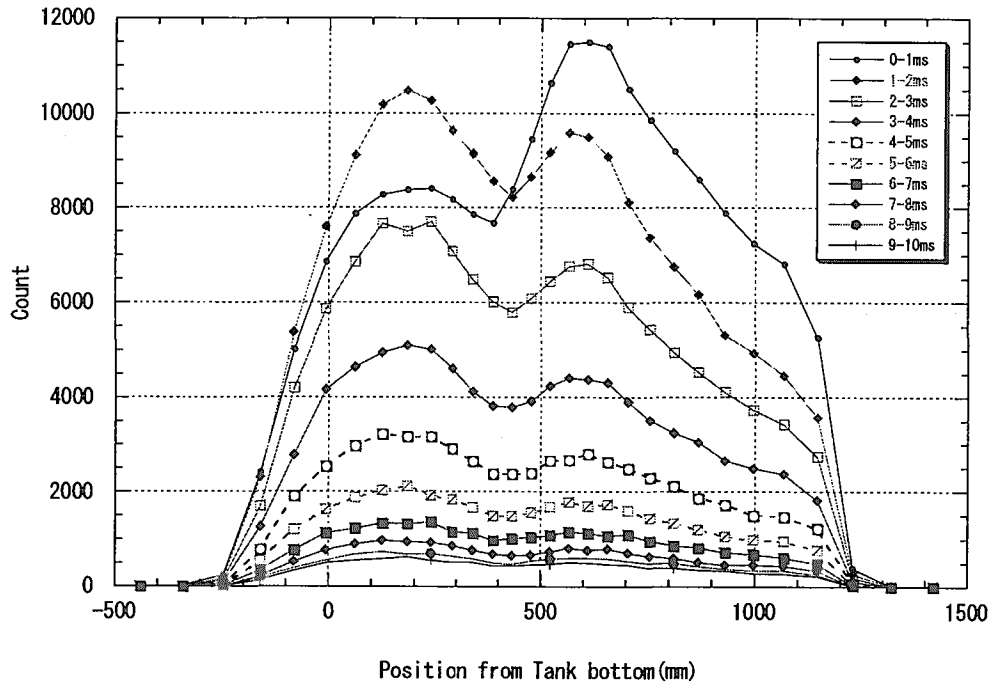


図 3.3.1.20 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-2.88\$ 低感度検出器)

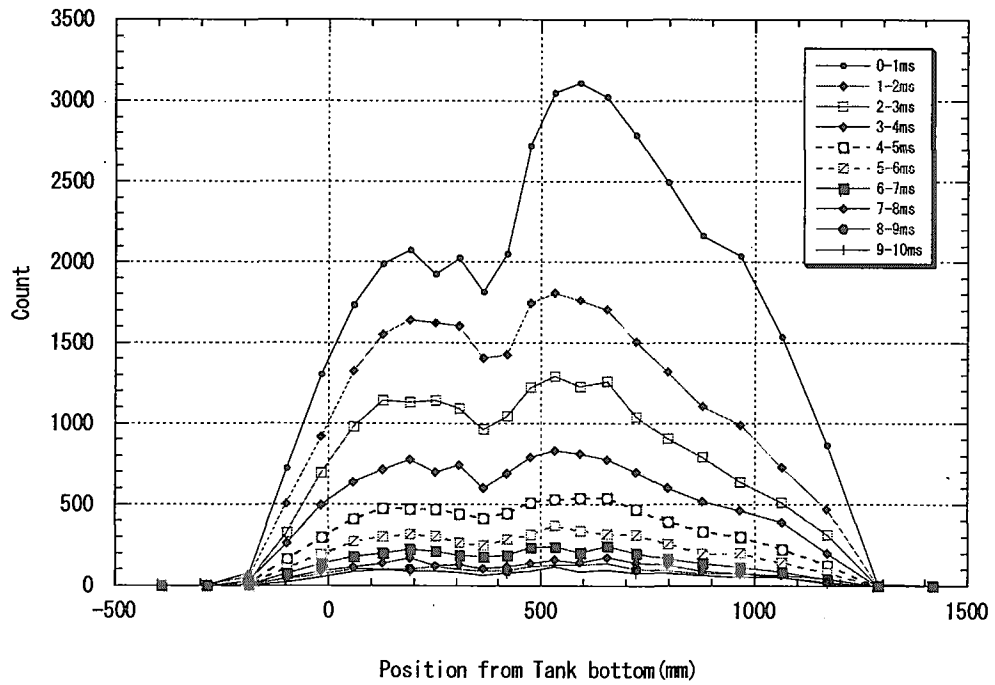


図 3.3.1.21 中性子束分布の時間変化
(Run401 (水反射体) 未臨界度-2.88\$ 高感度検出器)

3.3.2 中性子減衰定数 α の測定結果

未臨界状態の非均質炉心についてパルス中性子法による即発中性子減衰定数 α 値を PSPC の測定結果から評価を行った。実験を行った未臨界度は 3.3.1 の中性子束分布測定実験と同様に 0.3\$, 0.5\$, 1.0\$, 1.5\$, 3.0\$ の 5 点とした。

Run400 での PSPC で測定したパルス中性子発生装置からの、体系内での中性子の減衰の様子を図 3.3.2.1~図 3.3.2.20 に示す。未臨界体系での中性子の減衰は図からも指数関数的であることがわかる。これらの図の曲線は一般に下記の式で表される。

$$N = Ce^{-\alpha t} + B \dots \dots (3-1)$$

α = 即発中性子の減衰定数(sec⁻¹)
 ここで、 C = 計数の初期値(count) である。
 B = 計数のうち遅発中性子の寄与(count)
 t = パルス中性子発生後経過時間(msec)

各未臨界度での図を式(1)で最小二乗法によりフィッティングすると α 、 C 及び B は表 3.3.2.1 のようになる。このフィッティング結果については、測定結果の図中に示してある。表 3.3.2.1 から未臨界度が深くなるにつれて α 値が大きくなる、すなわち中性子の減衰が早くなっていることがわかる。しかし、-0.3\$ のときの低感度検出器の測定では、-0.5\$ のときよりも大きいためこの値は参考値とする。 α 値と未臨界度の関係を図 3.3.2.21 に示す。

表 3.3.2.1 各未臨界度での α, C, B の値及びフィッティング範囲 (Run400 裸体系)

未臨界度(\$)	定数	低感度検出器	高感度検出器
0.30	α	232.2	197.5
	C	205.1	711.6
	B	16.8	56.7
	フィッティング範囲	1.4msec~	0.9msec~
0.51	α	213.1	218.3
	C	474.1	1832.0
	B	37.8	153.6
	フィッティング範囲	0.6msec~	0.6msec~
1.00	α	269.0	273.9
	C	621.0	2531.8
	B	43.2	174.4
	フィッティング範囲	0.6msec~	0.6msec~
1.49	α	348.8	340.7
	C	648.9	2553.1
	B	25.7	100.3
	フィッティング範囲	0.6msec~	0.5msec~
3.03	α	539.5	558.8
	C	655.8	2784.5
	B	8.5	34.2
	フィッティング範囲	0.8msec~	0.7msec~

また同様に、Run401（水反射体系）での α 、C及びBの値を表3.3.2.2に、 α 値と未臨界度の関係を図3.3.2.22に示す。この測定では低感度検出器にはカドミウムを巻かなかつたため熱中性子を測定したことになる。図から最初の数ミリ秒後に熱中性子数が最大になっていることがわかる。これは3.3.2の中性子束分布測定実験の結果にも現れている。このため、図では指数減衰するまでの時間（約3～4ミリ秒）を除いてフィッティングを行っている。

表 3.3.2.2 各未臨界度での α ,C,Bの値及びフィッティング範囲（Run401 水反射体系）

未臨界度(\$)	定数	低感度検出器	高感度検出器
0.29	α	128.5	141.2
	C	6329.9	913.6
	B	1627.7	250.3
	フィッティング範囲	1.4msec～	1.0msec～
0.49	α	157.1	167.8
	C	7432.1	1051.5
	B	903.9	138.6
	フィッティング範囲	1.5msec～	1.4msec～
0.96	α	216.2	203.9
	C	18936.2	2496.0
	B	2226.1	319.9
	フィッティング範囲	2.3msec～	0.6msec～
1.45	α	313.3	287.0
	C	35818.2	4246.2
	B	1837.1	260.9
	フィッティング範囲	3.5msec～	2.0msec～
2.88	α	527.4	539.8
	C	52430.8	7399.4
	B	705.8	104.0
	フィッティング範囲	3.0msec～	3.5msec～

α 値については炉心タンク、反射体水槽等によって決まるものであり、本来裸体系と水反射体系で今回の測定結果ほど大きくは変わらない。これは、R401の測定では低感度検出器にカドミウムを巻かず設置したため、計数率が上がってしまい、測定回路の不感時間によって数え落としが発生し、 α 値に影響を与えたのではないかと考えられる。これについては今後、測定系の計数率の違いによる不感時間の測定を行う必要がある。

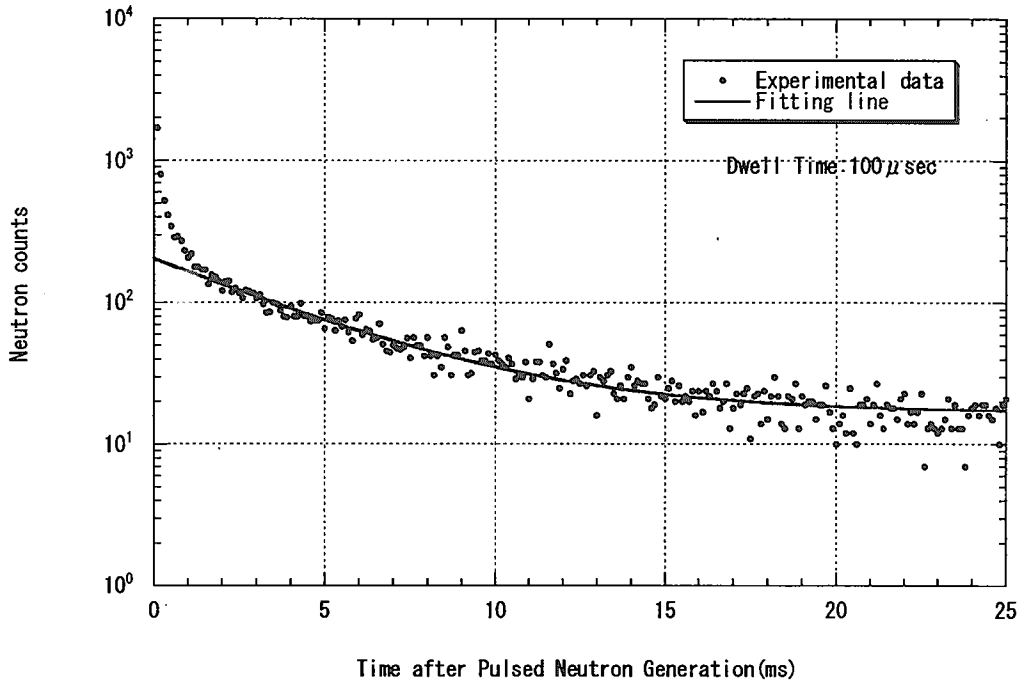


図 3.3.2.1 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-0.30\$ 低感度検出器)

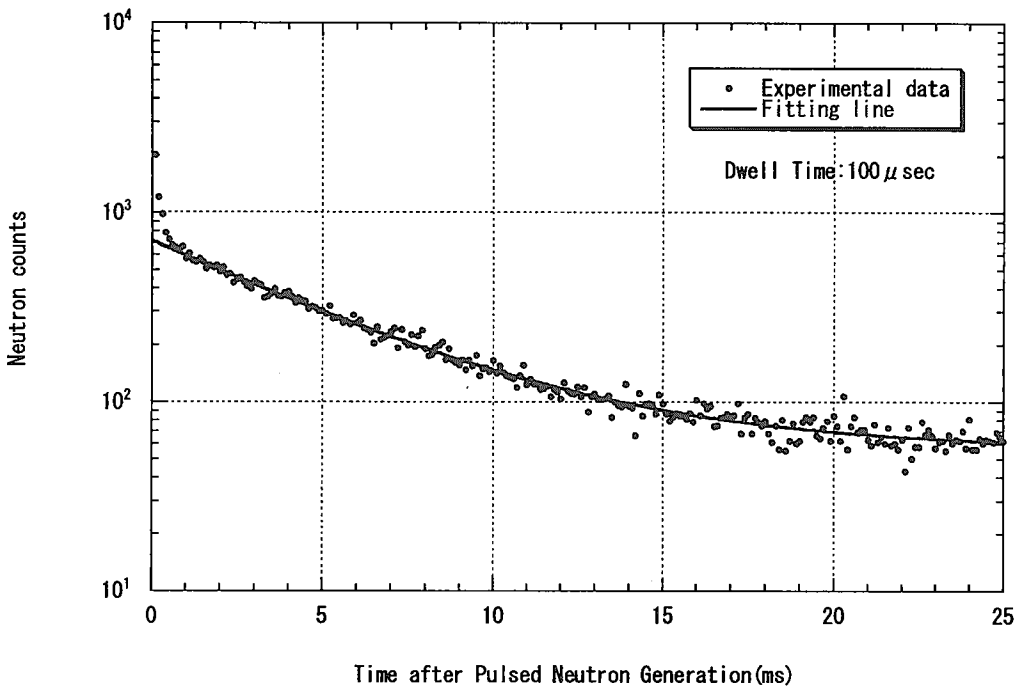


図 3.3.2.2 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-0.30\$ 高感度検出器)

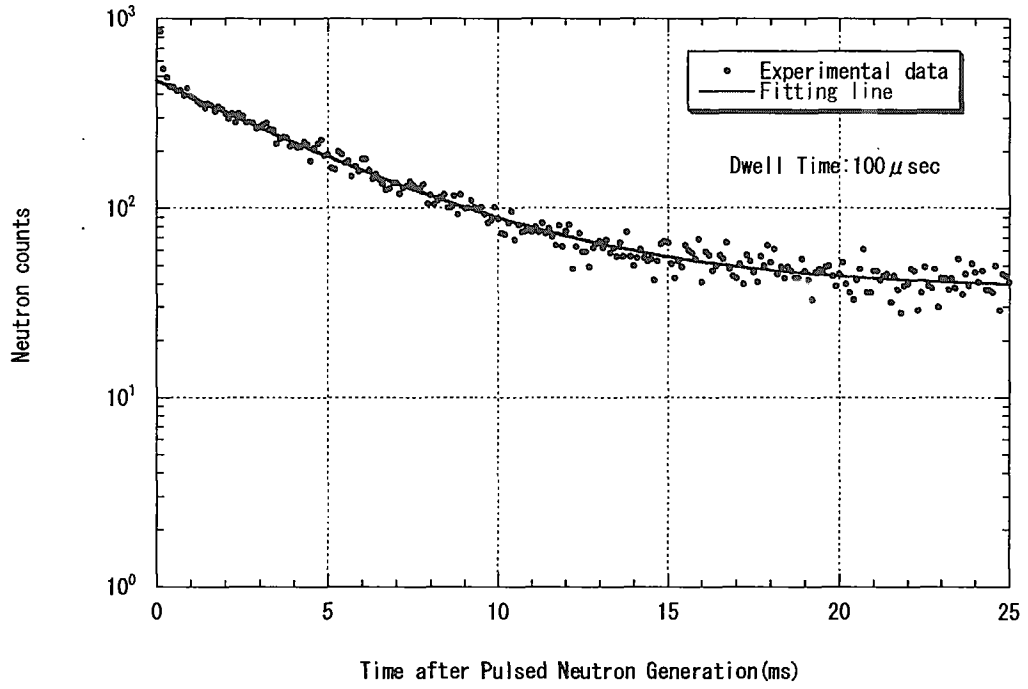


図 3.3.2.3 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-0.51\$ 低感度検出器)

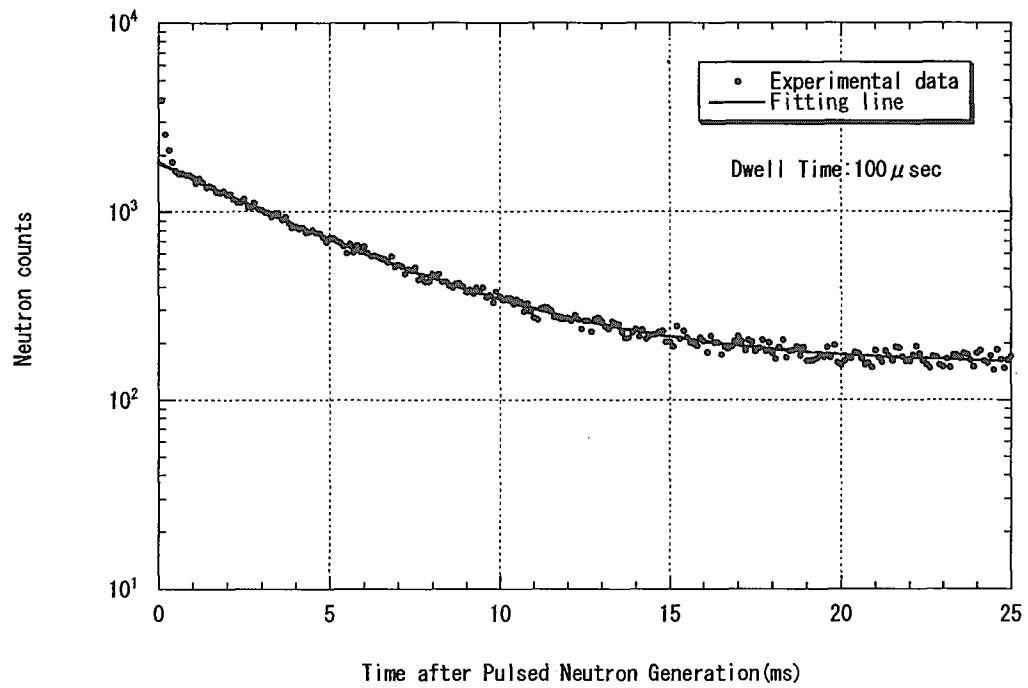


図 3.3.2.4 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-0.51\$ 高感度検出器)

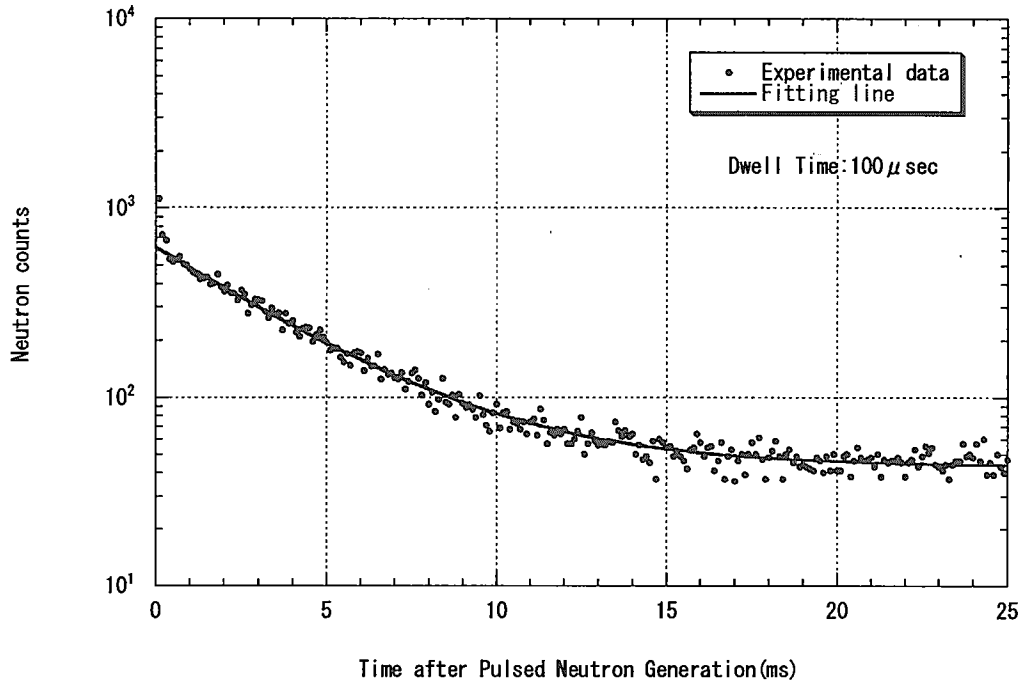


図 3.3.2.5 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-1.00\$ 低感度検出器)

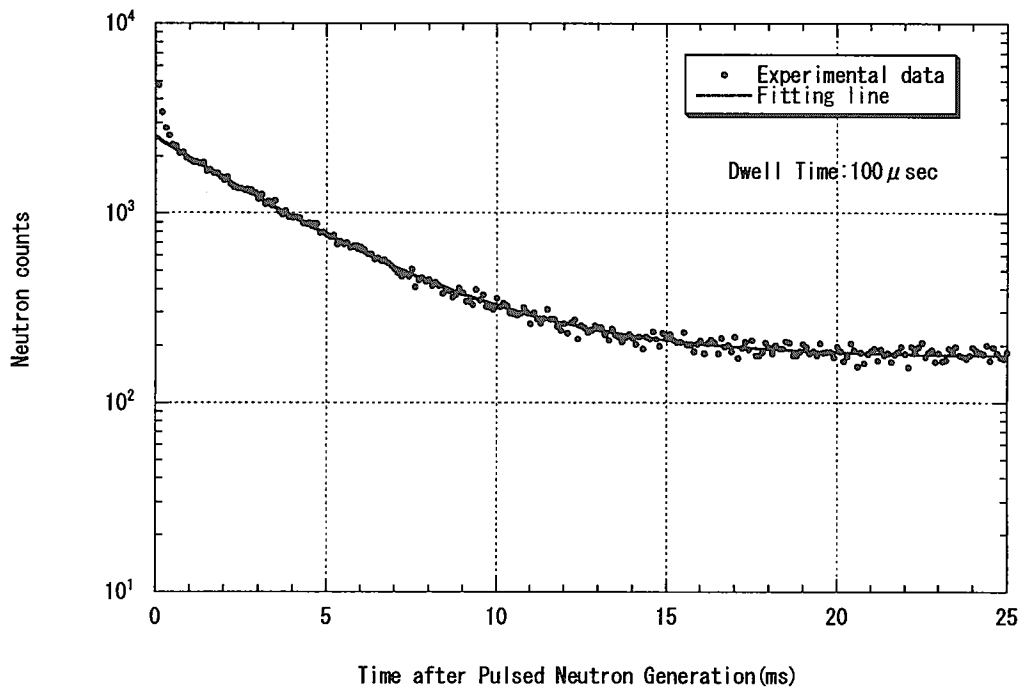


図 3.3.2.6 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-1.00\$ 高感度検出器)

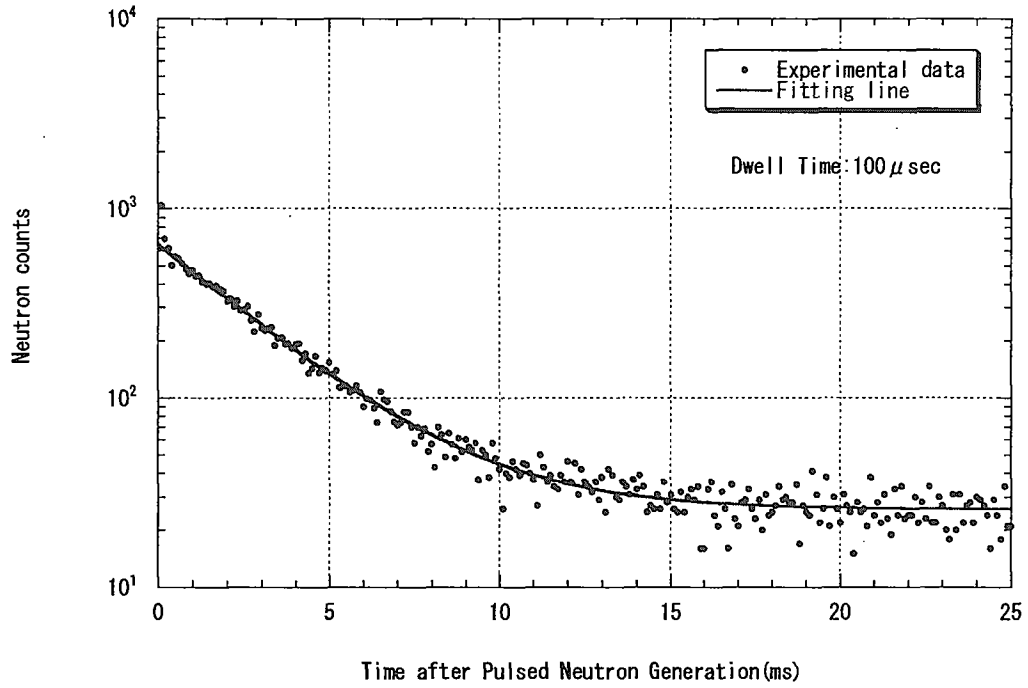


図 3.3.2.7 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-1.49\$ 低感度検出器)

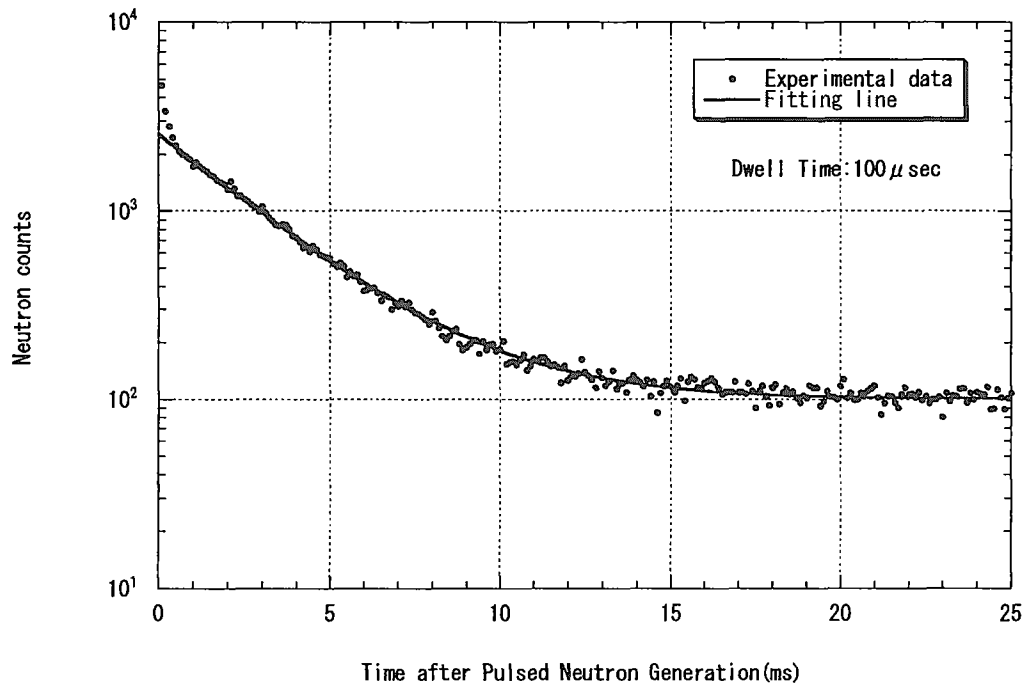


図 3.3.2.8 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-1.49\$ 高感度検出器)

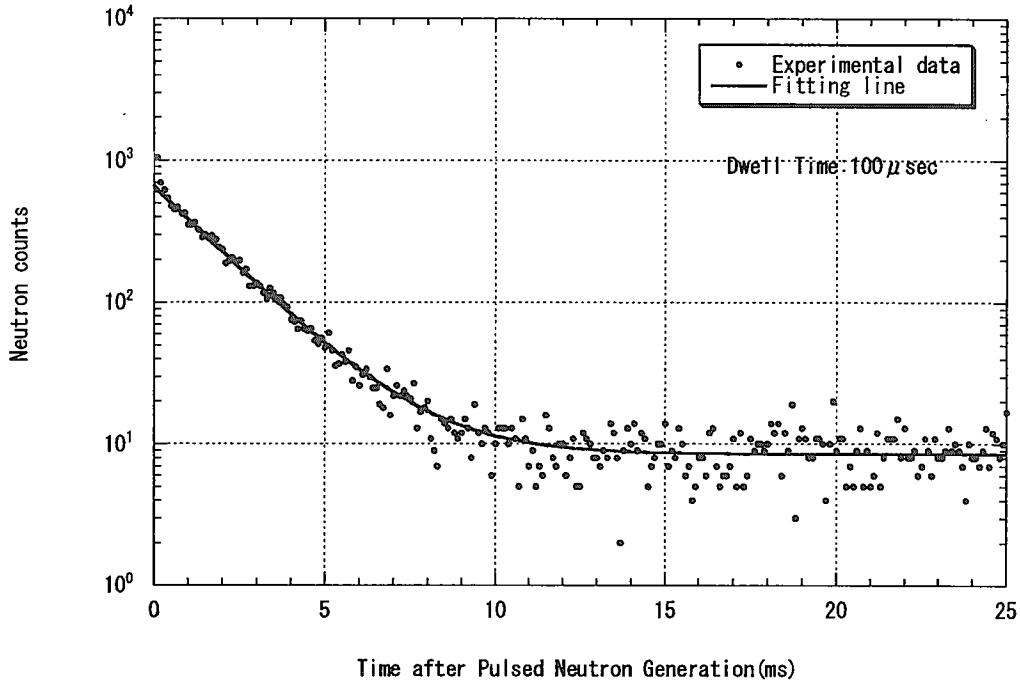


図 3.3.2.9 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-3.03\$ 低感度検出器)

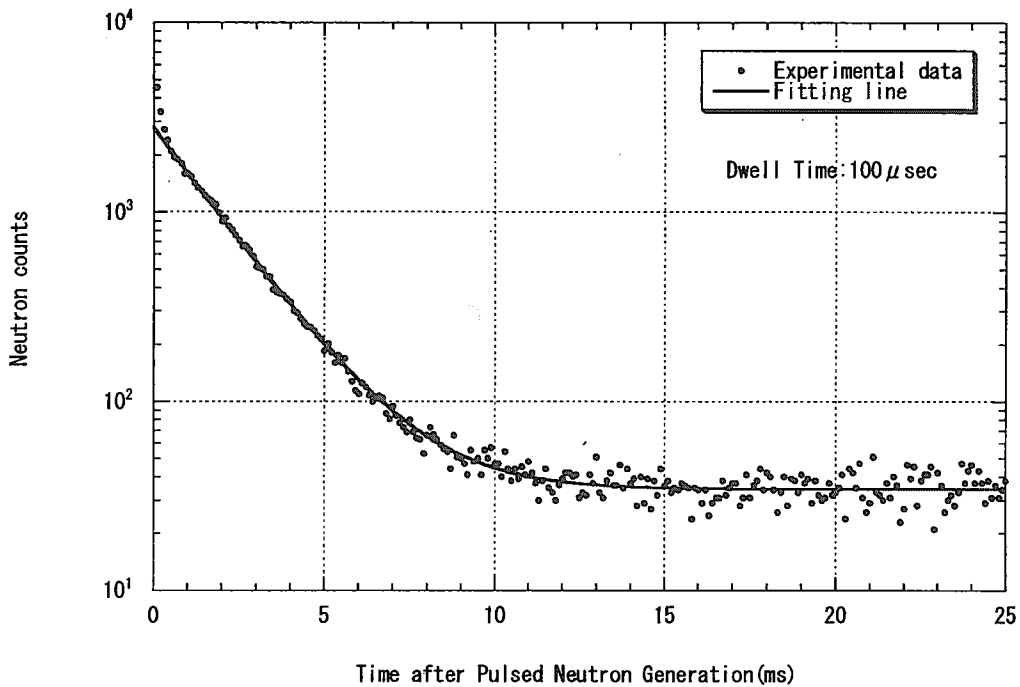


図 3.3.2.10 中性子減衰曲線(Run400 未臨界度-3.03\$ 高感度検出器)

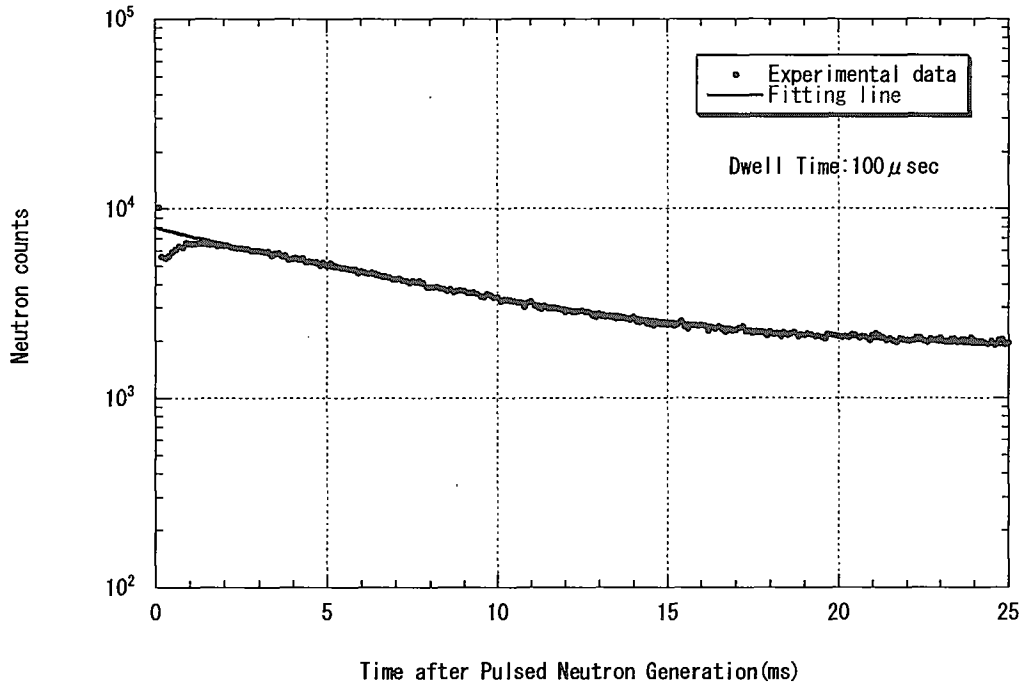


図 3.3.2.11 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.29\$ 低感度検出器)

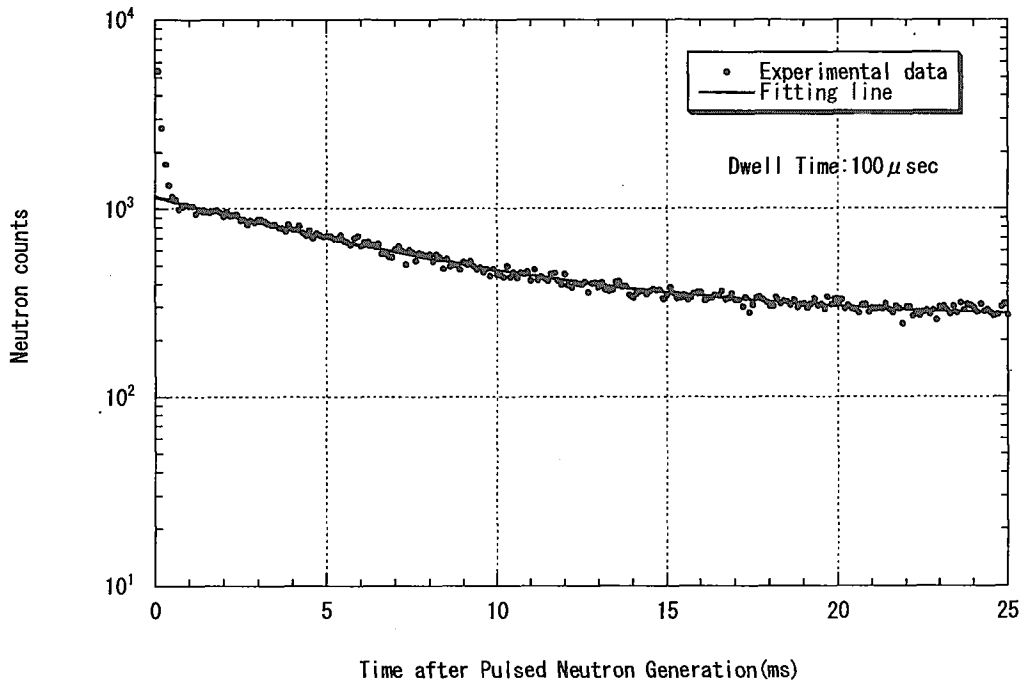


図 3.3.2.12 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.29\$ 高感度検出器)

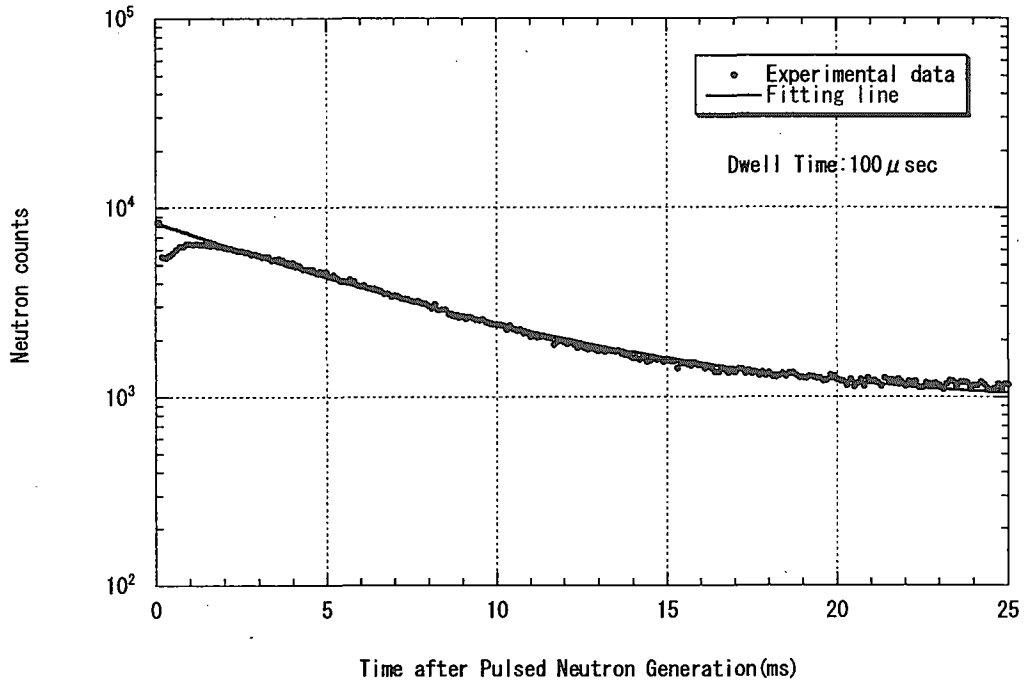


図 3.3.2.13 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.49\$ 低感度検出器)

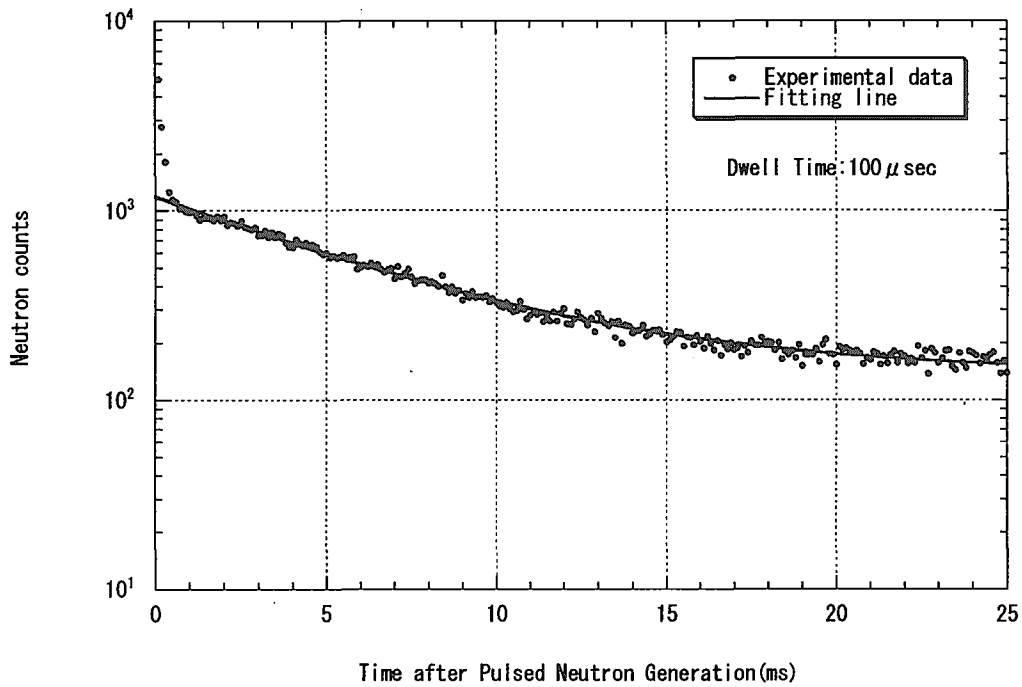


図 3.3.2.14 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.49\$ 高感度検出器)

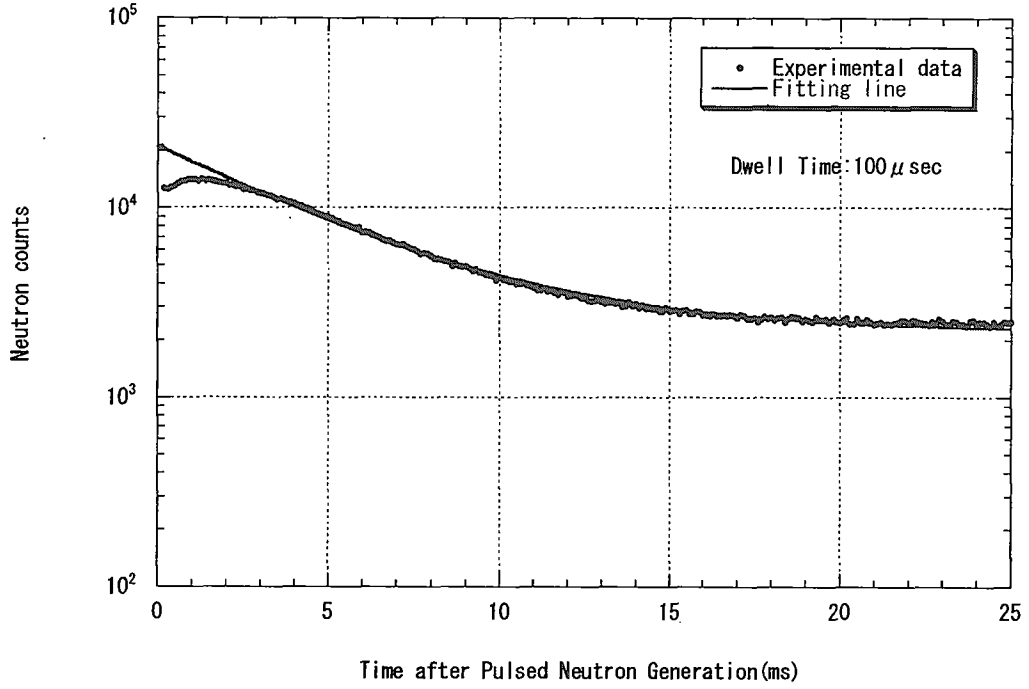


図 3.3.2.15 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.96\$ 低感度検出器)

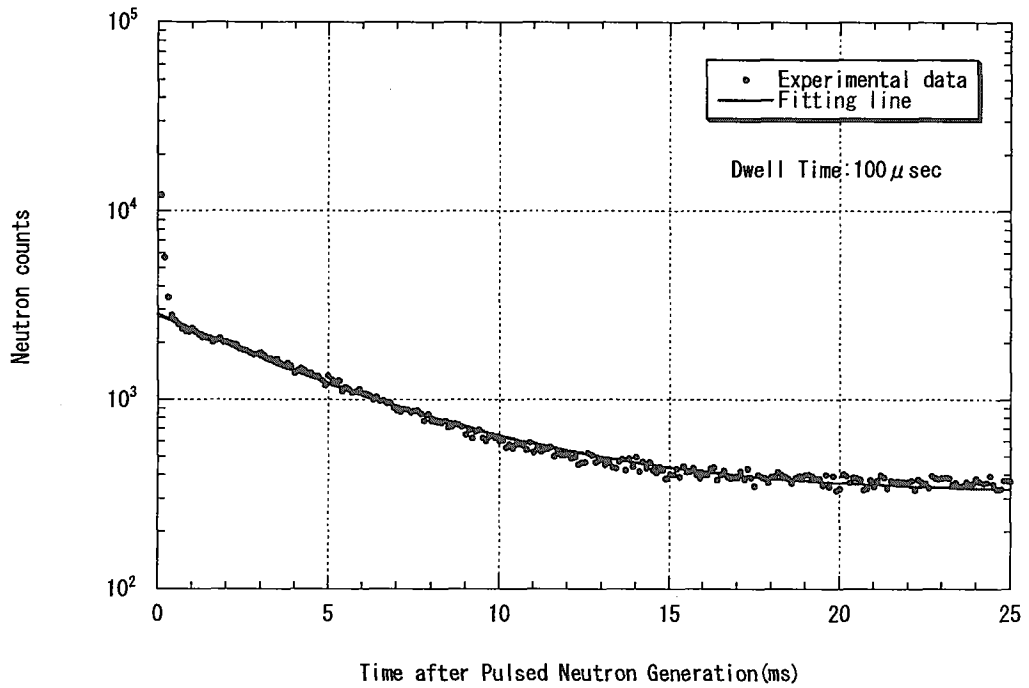


図 3.3.2.16 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-0.96\$ 高感度検出器)

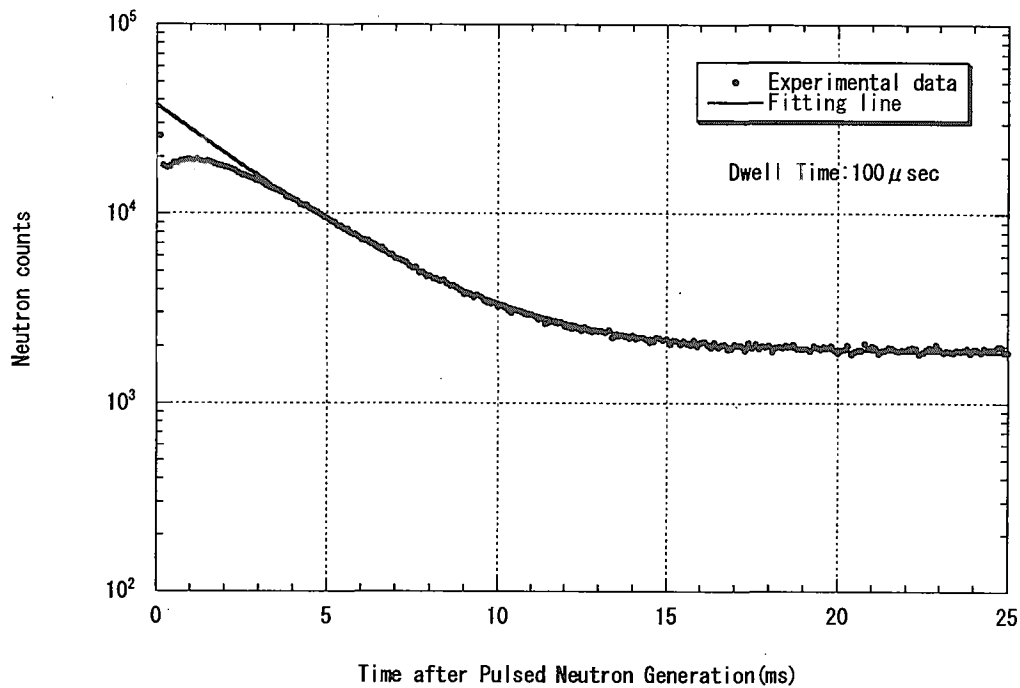


図 3.3.2.17 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-1.45\$ 低感度検出器)

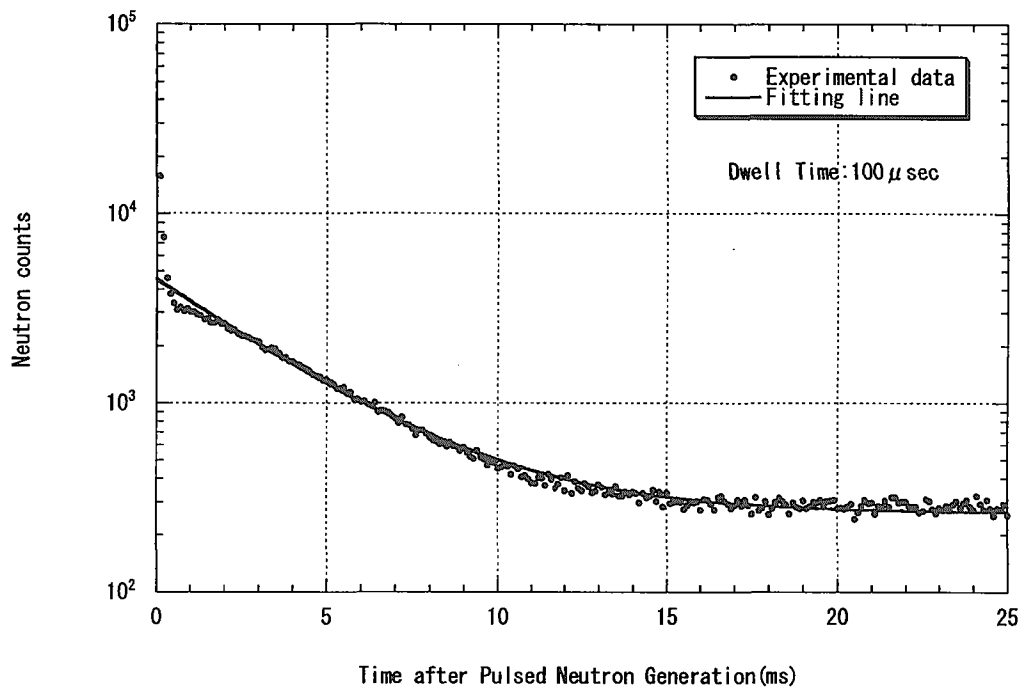


図 3.3.2.18 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-1.45\$ 高感度検出器)

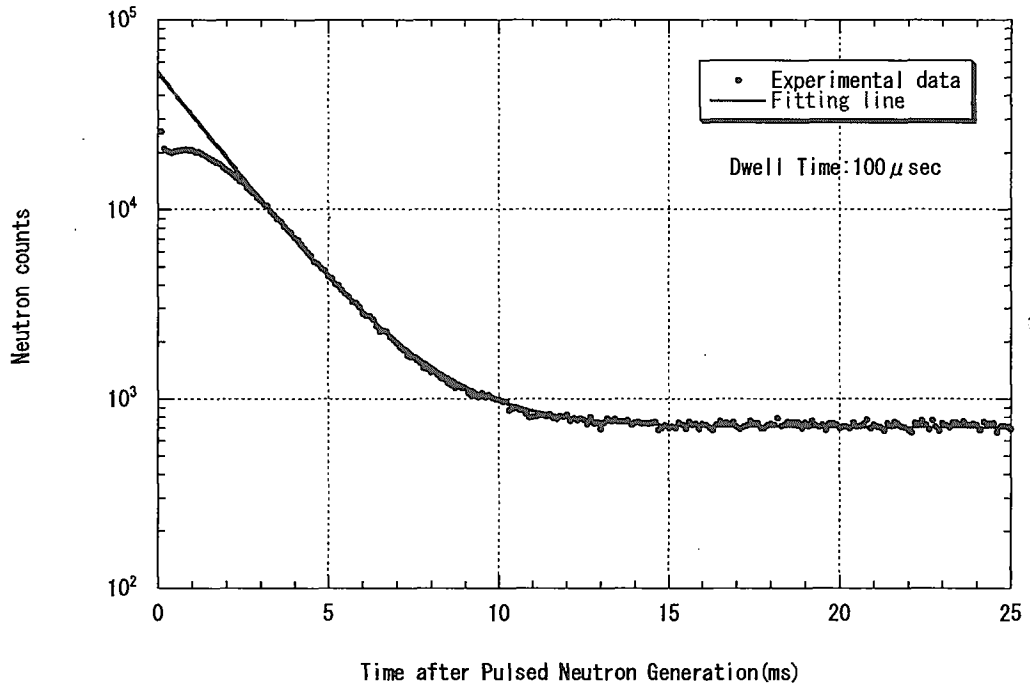


図 3.3.2.19 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-2.88\$ 低感度検出器)

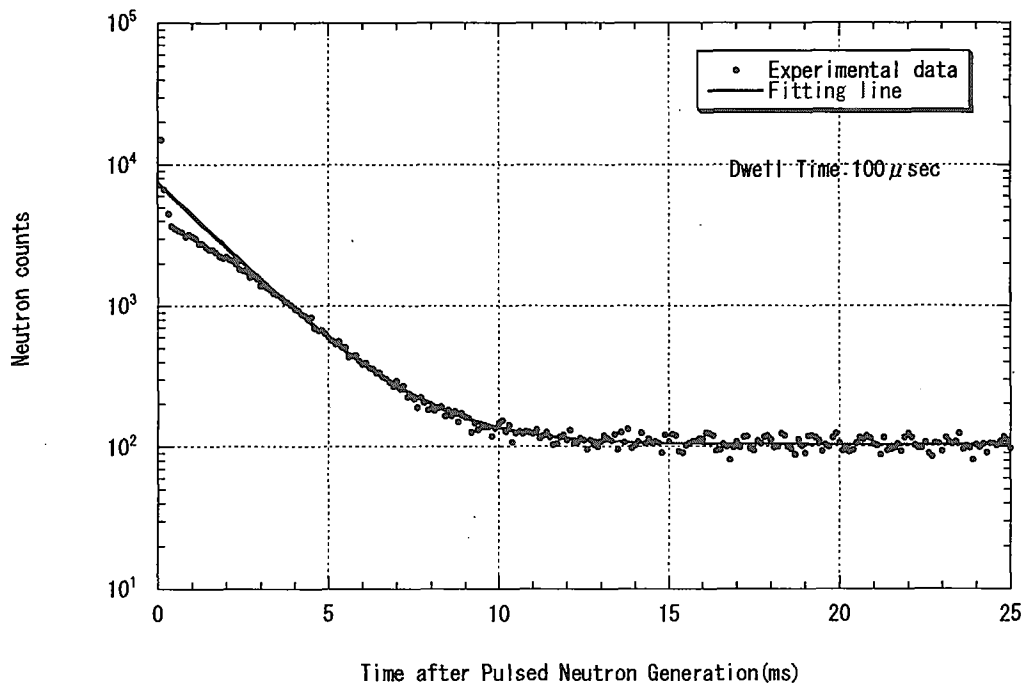


図 3.3.2.20 中性子減衰曲線(Run401 未臨界度-2.88\$ 高感度検出器)

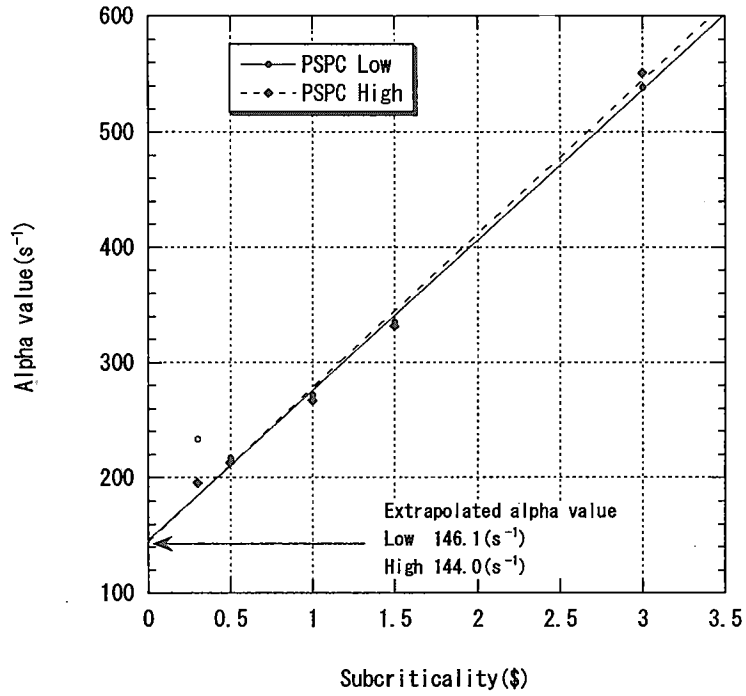


図 3.3.2.21 未臨界度と α 値のグラフ (Run400)

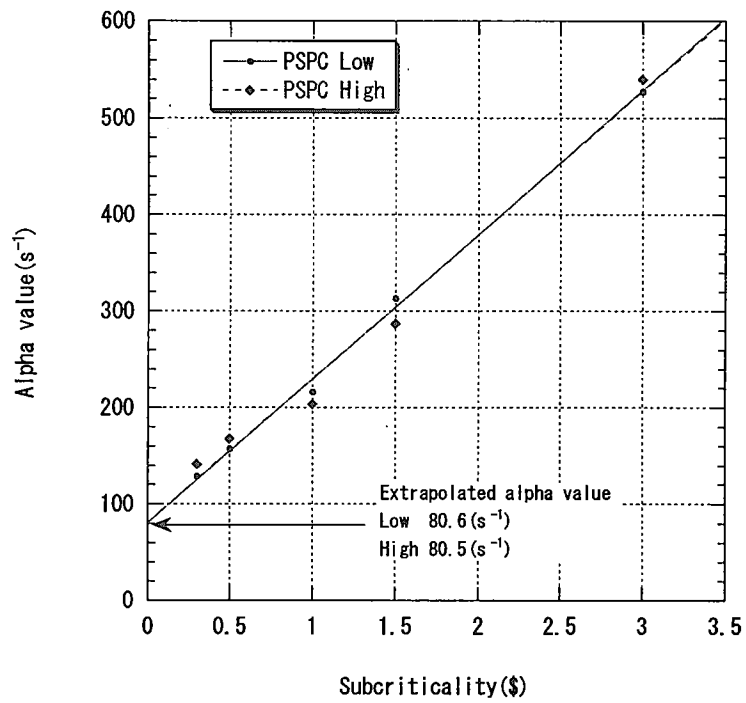


図 3.3.2.22 未臨界度と α 値のグラフ (R401)

4. PSPC 測定値と MCNP による計算値の比較

4.1 計算の目的

PSPC による測定値の検証を行うため、MCNP 4C3²⁾により PSPC 設置位置における中性子束分布及びPSPCの検出ガスとして用いられている³Heの中性子吸収反応率分布を求め、PSPC 測定値と比較した。

4.2 計算条件

MCNP による計算により、表 4.1 及び表 4.2 に示す計算条件において、以下に示す3種類の結果を算出した。なお、ライブラリには、JENDL-3.2³⁾を用いた。

(1) track length estimator による中性子束の算出

PSPC 設置位置に PSPC と同サイズ (直径 2.54cm の円柱) のセルを設定し、track length estimator によりセル内の中性子束を算出した。このセルの軸方向の分割は、中心部分では 2cm、端部では 5cm とした。

(2) track length estimator による ³He 反応率の算出 (カドミウムカバーなしのケースのみ)

上記と同じ設定のセルに対して、³He の中性子吸収反応率を算出した。

(3) point detector による ³He 反応率の算出 (裸体系の臨界計算のみ)

PSPC 設置位置において、point detector により ³He の中性子吸収反応率を算出した。point detector は、1回の計算につき 20 個までという制限があるため、2回の計算により、40 点の結果を算出した。各検出器の間隔は、中心部では 2.5cm、端部では 5cm とした。

計算は、未臨界体系 (R383 及び R386) と臨界体系の双方について行った。なお、未臨界体系については、線源位置を起動用中性子源である ²⁴¹Am-Be の位置に設定した固定源計算を行い、臨界体系については臨界計算を行った。

固定源計算については、計算に使用したライブラリである JENDL-3.2 がバイアスを持つため、未臨界度が浅いステップについて計算を行うと、体系が臨界になり、計算が終了しなくなる可能性がある。このため、R383 及び R386 とともに、未臨界度が $\cdot 1\%$ 付近のステップについて計算を行い、中性子束分布を求めた。

図 4.1～図 4.2 に代表的な計算体系図を示す。測定値のまた、図 4.3～図 4.4 にタリー設定位置の詳細図を示す。なお、原子個数密度等の計算条件は、付録に示す。

4.3 計算結果

図 4.5～図 4.26 に PSPC 測定値と MCNP 計算結果を比較した図を示す。計算値は、液位の半分の高さ付近における測定値に対して規格化されている。なお、R383 に対する計算結果のグラフには、参考として、R382（ウラン濃度 215.5g/L、硝酸濃度 2.548N、密度 1.3700g/cm³）におけるカドミウムカバー付き金線の測定結果もプロットしている。

計算結果を測定値と比較すると、以下のことが分かる。

4.3.1 臨界時のカドミウムカバー付き PSPC 測定値と計算値の比較について

- ・ 裸体系における軸方向分布の計算結果は、図 4.5、図 4.6 及び図 4.11～図 4.16 に示すように、全体的に臨界液位の半分の高さから上部では、測定値と概ね一致している。これに対して、臨界液位の半分の高さから下部では、計算値は測定値に対して過小評価となっている。
- ・ 水反射体系における軸方向分布の計算結果は、図 4.21 に示す R381 の結果では、測定値とよく一致している。図 4.23 に示す R398 の結果では、全体的に測定値よりも上方に約 4.7cm ずれており、また図 4.26 に示す R401 の結果では、測定値よりも下方に約 6.7cm ずれているものの、分布の形としては、概ね一致している。
- ・ 図 4.6 に示すように、R383 における計算結果は、R382 におけるカドミウムカバー付き金線の測定結果とよく一致している。
- ・ 図 4.9 に示すように、R387 におけるタンク直下の径方向分布の計算結果は、タンク中心の値を基準として規格化した場合、測定値に対して、タンク内部の値はほぼ一致しているが、タンクの外部では過小評価となっている。軸方向分布測定時の PSPC 設置位置（タンク中心からの距離 32.8cm 及び 38.8cm）において、計算値を測定値と比較すると、タンク中心の値で規格化した場合、計算値は測定値に対して、タンク中心からの距離 32.8cm では約 44%、38.8cm では約 46%それぞれ過小評価となっている。
- ・ 図 4.10 に示すように、R387 におけるタンク南方向の径方向分布計算結果は、タンク表面から 24cm までは、測定値との差が大きい。これは、その範囲の測定位置となる PSPC の端部では、感度が弱いためであると考えられる。

4.3.2 臨界時のカドミウムカバーなし PSPC 測定値（R380 の低感度及び高感度、R401 の低感度）と計算値の比較について

- ・ 図 4.17～図 4.20 に示すように、R380 に対する計算値は、測定値に対して上方にずれているものの、分布の形としてはよく一致している。ピーク位置のずれは、低感度 PSPC で約 6cm、高感度 PSPC で約 3cm である。
- ・ 図 4.24 及び図 4.25 に示すように、R401 の低感度 PSPC 測定値に対する計算

値は、全体的に上方に約 2cm ずれているが、よく一致している。

4.3.3 未臨界時の PSPC 測定結果と、固定源計算による計算値の比較について

- ・ 図 4.7 及び図 4.8 に示すように、裸体系の未臨界時 (R383 step3) における計算値は、測定値に対して、臨界時における場合と同様に、臨界液位の半分の高さより上部では両者は概ね一致しているが、それより下部では、両者の差が大きくなっている。
- ・ 図 4.22 に示すように、水反射体系の未臨界時 (R386 step 4) における計算値は、測定値の統計が悪いため比較が困難であるが、液位の半分よりも上部では測定値と似た分布となっているものの、それより下部では測定値との差が大きくなっている。

4.4 計算結果に対する検討

4.4.1 臨界時のカドミウムカバー付き PSPC 測定値と計算値の比較について

全体的に計算値は、測定値に対して、臨界液位の半分から下部では過小評価となっている。これは、実際の測定において、カドミウムを PSPC の端部に巻くことが出来なかったことにより、その端部から中性子が検出器内に入る現象を、計算で再現できていないためであると考えられる。この原因は、タリーを取る領域が小さいために、中性子がタリー領域の下端へ入射する確率が低くなり、その結果として計算値が測定値に対して過小評価となったためと考えられる。しかし、図 4.6 に示すように、計算値はカドミウムカバー付き金線の測定値とよく一致しているため、PSPC に完全にカドミウムを巻いて測定を行った場合の中性子束分布は、計算値に近いものになると考えられる。

4.4.2 臨界時のカドミウムカバーなし PSPC 測定値と計算値の比較について

図 4.17～図 4.20 及び図 4.24、図 4.25 に示すように、計算値の分布は、カドミウムカバーなしの PSPC 測定値に対して、約 2cm～6cm 上方にずれているが、分布の形としてはよく一致している。特に図 4.24 及び図 4.25 に示す R401 における計算結果は、測定値とよく一致しており、この測定に関しては、計算により測定値の検証が出来たと言える。

4.4.3 未臨界時の PSPC 測定結果と、固定源計算による計算値の比較について

未臨界体系における中性子束分布は、中性子源を STACY の起動用中性子源である $^{241}\text{Am}\cdot\text{Be}$ の位置に設定して、固定源計算により求めた。

R383 の未臨界体系については、臨界時における測定値と計算値の比較結果と同様な結果が得られた。R386 の未臨界体系については、概ね R383 の場合と同様な

傾向が見られるものの、測定値の統計が悪いために、比較が困難であった。未臨界度がより浅い、-0.5\$程度のステップの測定値であれば、測定値の統計が良くなり、計算値との比較が容易になると考えられるが、計算においては、JENDL-3.3等のバイアスの小さいライブラリを用いる必要がある。

表 4.1 MCNP の計算条件 (裸体系)

計算対象 Run No.	step	液位 (cm)	反応度 (\$)	U 濃度 (g/L)	硝酸濃度 (N)	溶液密度 (g/cm ³)	タリ一設置位置*1(cm) (x, y)	カドミウムカ バー*2	計算 手法	ヒストリ数*5.
383	6	47.42	0.0	217.9	2.570	1.3739	高感度 : (38.8, 2.0) 低感度 : (32.8, -2.0)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万 point detector:550 万
383	3	45.27	-1.01	217.9	2.570	1.3739	高感度 : (38.8, 2.0) 低感度 : (32.8, -2.0)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	固定源	track length:34 万
387 (径方向)	8	52.13	0.0	155.4	2.616	1.2914	高感度 : 26.5*3 低感度 : -3.33*3	高感度 : 40.5 ~180cm*4 低感度 : -70.0 ~70.0cm*4	臨界	track length:4050 万
388	8	52.08	0.0	154.4	2.608	1.2898	高感度 : (38.8, 2.0) 低感度 : (32.8, -2.0)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万 point detector:550 万
397	8	57.779	0.0	101.8	2.536	1.2174	高感度 : (38.8, 2.0) 低感度 : (32.8, -2.0)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万 point detector:550 万
400	7	66.393	0.0	50.7	2.53	1.1487	高感度 : (38.8, 2.0) 低感度 : (32.8, -2.0)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万 point detector:550 万

*1 (x, y)は図 4.3 を参照。

x : タンク中心からタリ一設定セル中心までの距離。

y : タンク中心からタリ一設定セル中心までの y 方向へのずれ。

*2 液位ゼロからの軸方向高さを示す。

*3 タリ一設定セルの z 座標を示す。図 4.4 を参照。

*4 タンク中心からの距離を示す。

*5 臨界計算においては、スキップ 50 万ヒストリを含む。

表 4.2 MCNP の計算条件 (水放射体系)

計算対象 Run No.	step	液位 (cm)	反応度 (\$)	U 濃度 (g/L)	硝酸濃度 (N)	溶液密度 (g/cm ³)	タリ一設置位置*1(cm) (x, y)	カドミウムカ バー*2	計算 手法	ヒストリ数*3
380	13	44.89	0.0	213.6	2.53	1.3662	高感度 : (43.8, 3.4) 低感度 : (43.8, -1.2)	なし	臨界	track length:5050 万
381	13	44.876	0.0	215.4	2.547	1.3698	低感度 : (38.8, -1.2)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万
386	4	47.35	-0.95	154.7	2.608	1.2903	低感度 : (38.8, -1.2)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	固定源	track length:70 万
398	8	55.729	0.0	102.0	2.539	1.2177	低感度 : (38.8, -1.2)	下端 : -19cm 上端 : 148cm	臨界	track length:5050 万
401	6	64.693	0.0	51.7	2.535	1.1505	高感度 : (38.8, 3.5) 低感度 : (38.8, -1.2)	下端 : -19cm 上端 : 148cm 高感度のみ	臨界	track length:5050 万

*1 (x, y)は図 4.3 を参照。

x : タンク中心からタリ一設置セル中心までの距離。

y : タンク中心からタリ一設置セル中心までの y 方向へのずれ。

*2 液位ゼロからの軸方向高さを示す。

*3 臨界計算においては、スキップ 50 万ヒストリを含む。

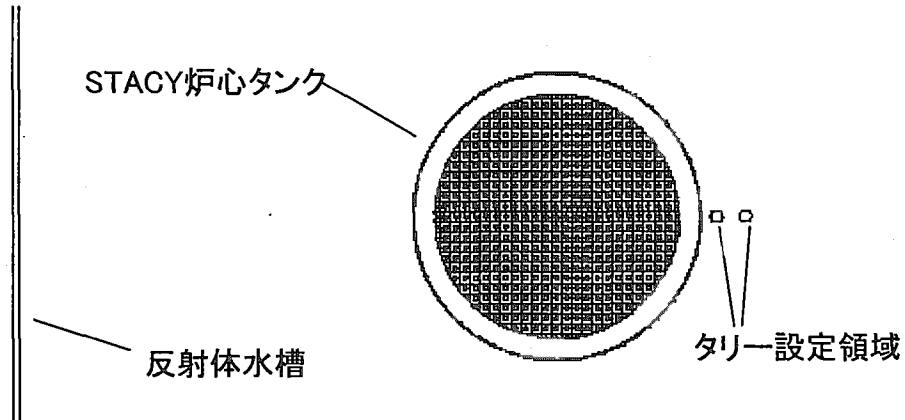


図 4.1 MCNP の計算体系例 (平面図)

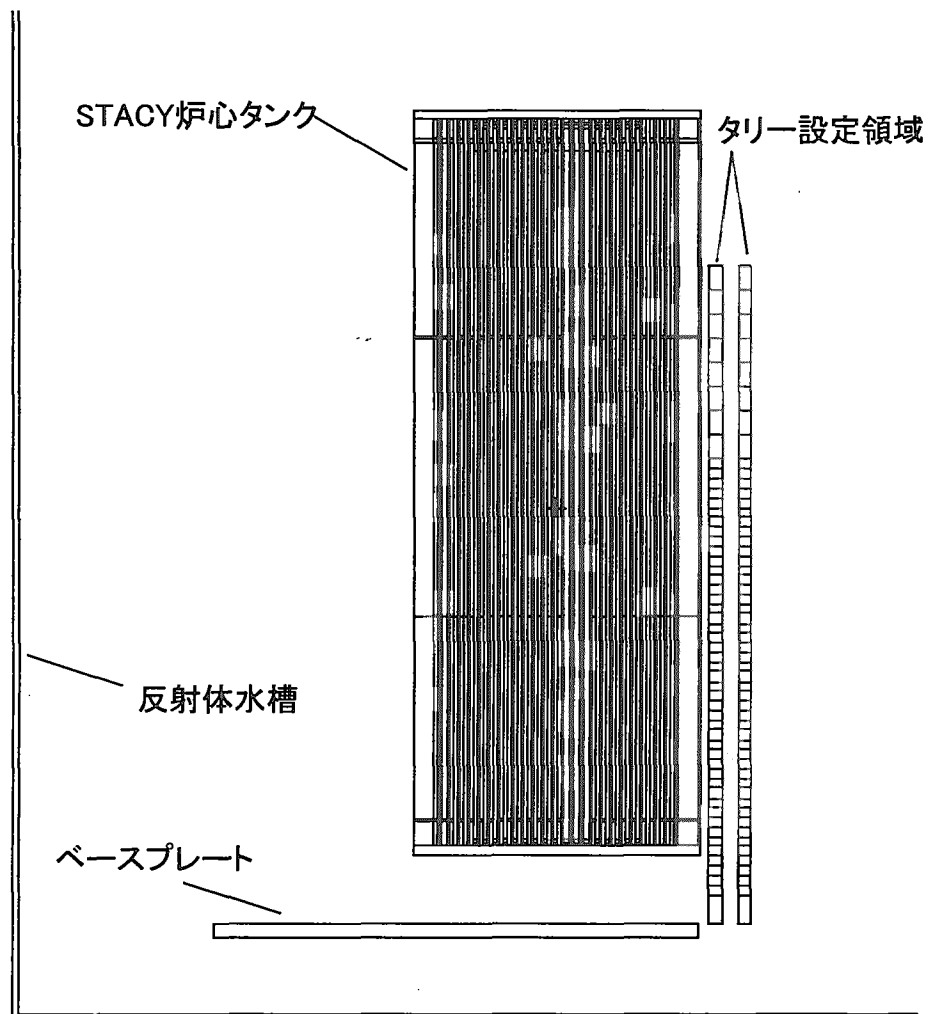


図 4.2 MCNP の計算体系例 (断面図)

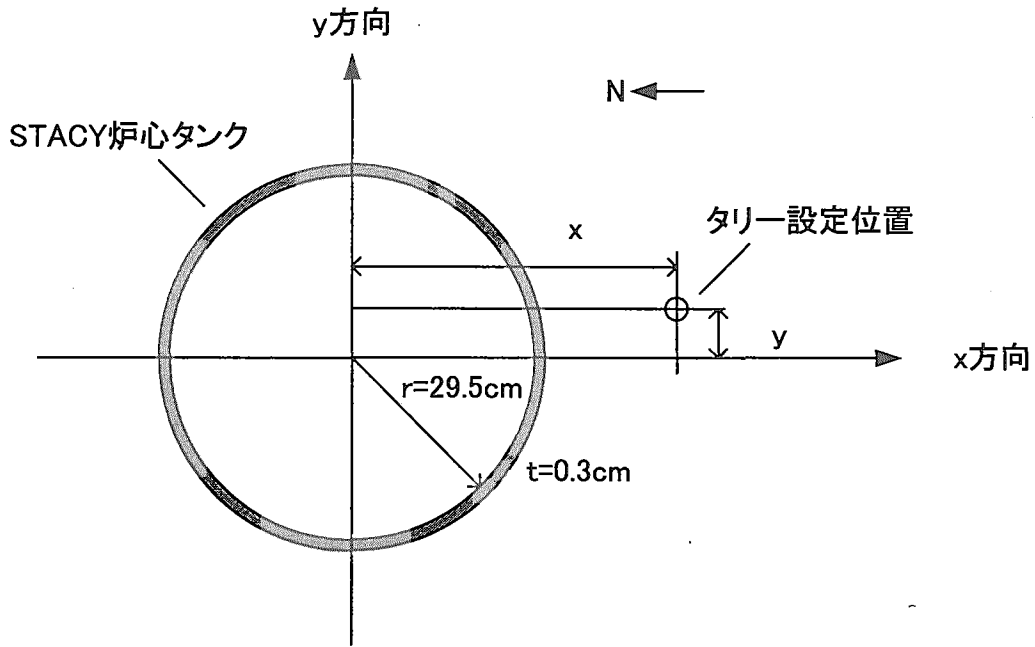


図 4.3 軸方向中性子束分布計算時におけるタリ一設定位置平面図

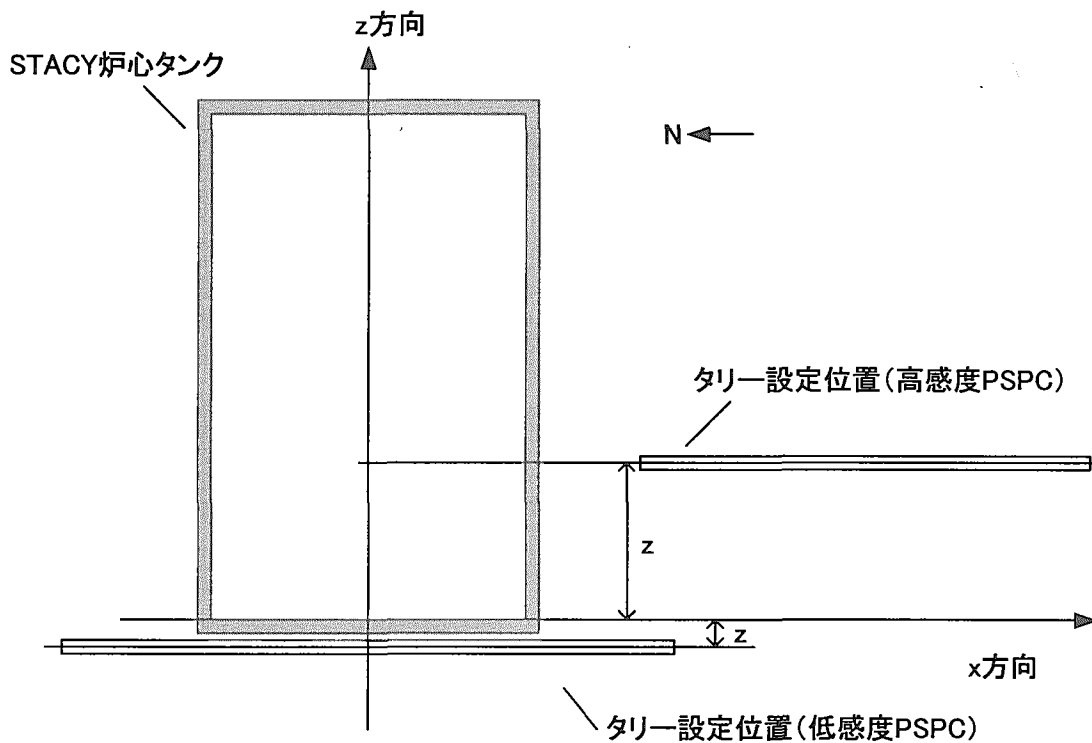


図 4.4 径方向中性子束分布計算時 (R387) におけるタリ一設定位置断面図

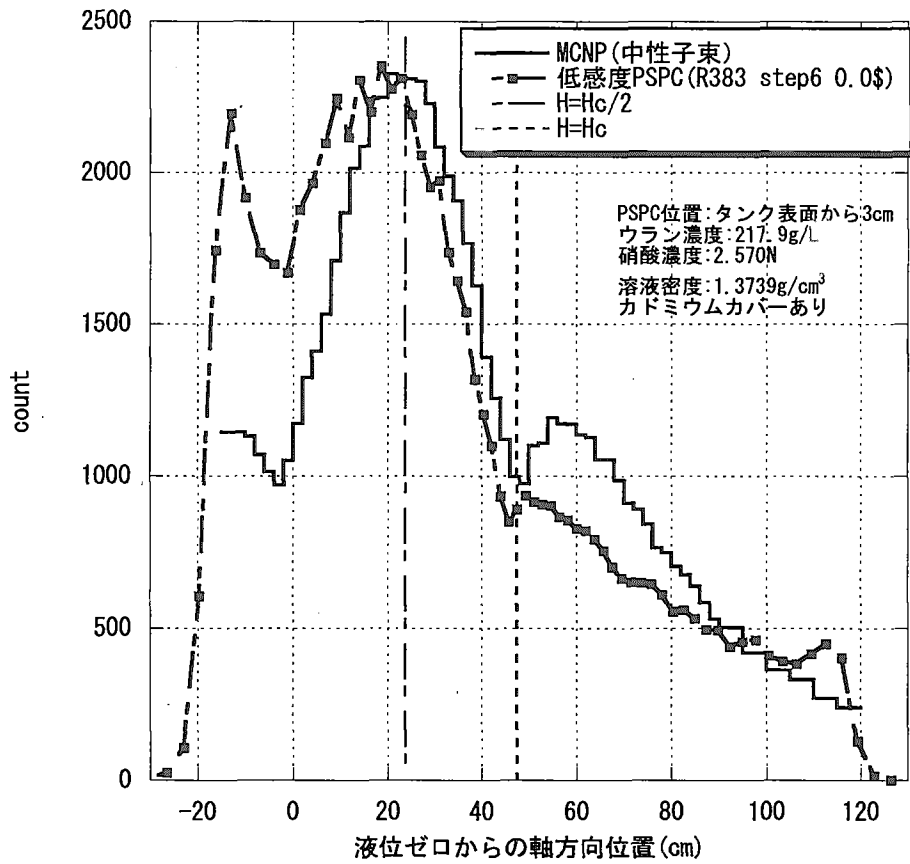


図 4.5 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値 (R383) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

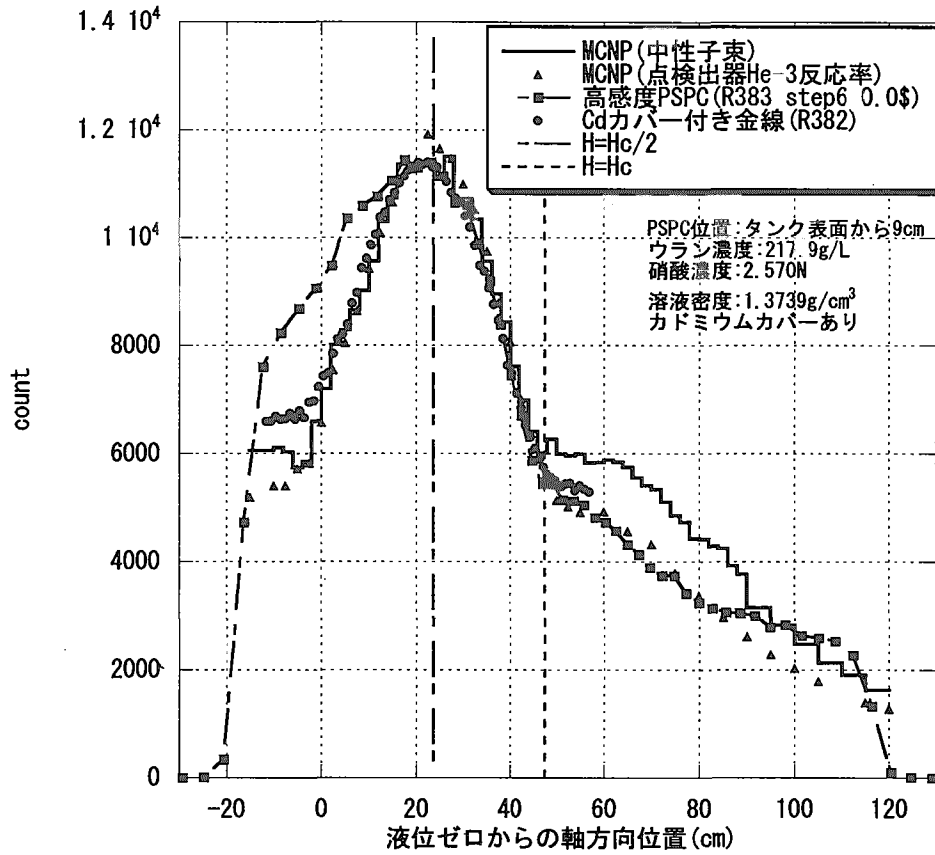


図 4.6 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値 (R383) 及びカドミウムカバー付き金線測定値 (R382) と MCNP 計算値 (中性子束、³He 反応率) の比較

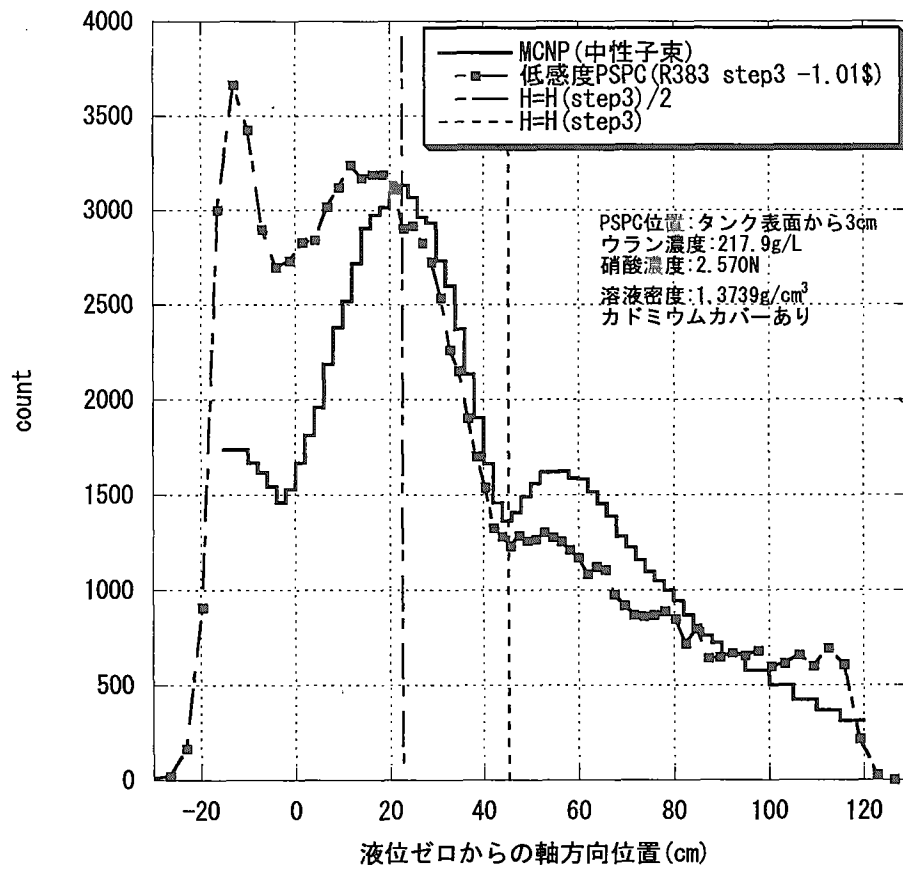


図 4.7 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値(R383)と
 固定源計算における MCNP 計算値 (中性子束) の比較

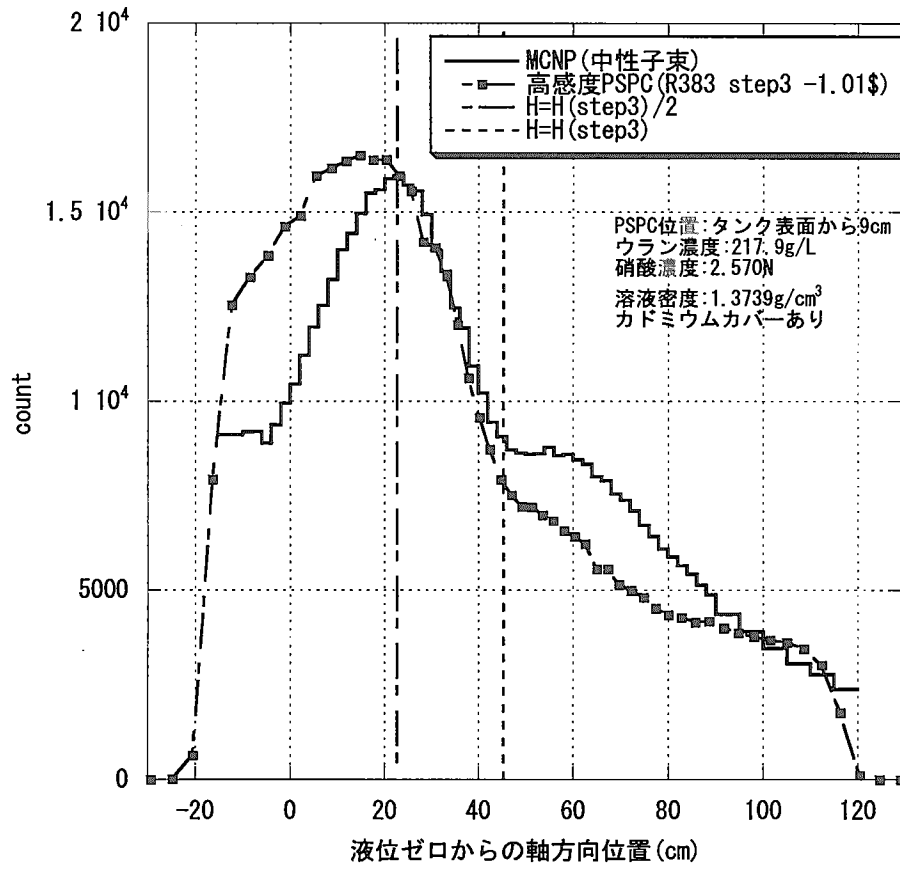


図 4.8 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値 (R383) と固定源計算における MCNP 計算値 (中性子束) の比較

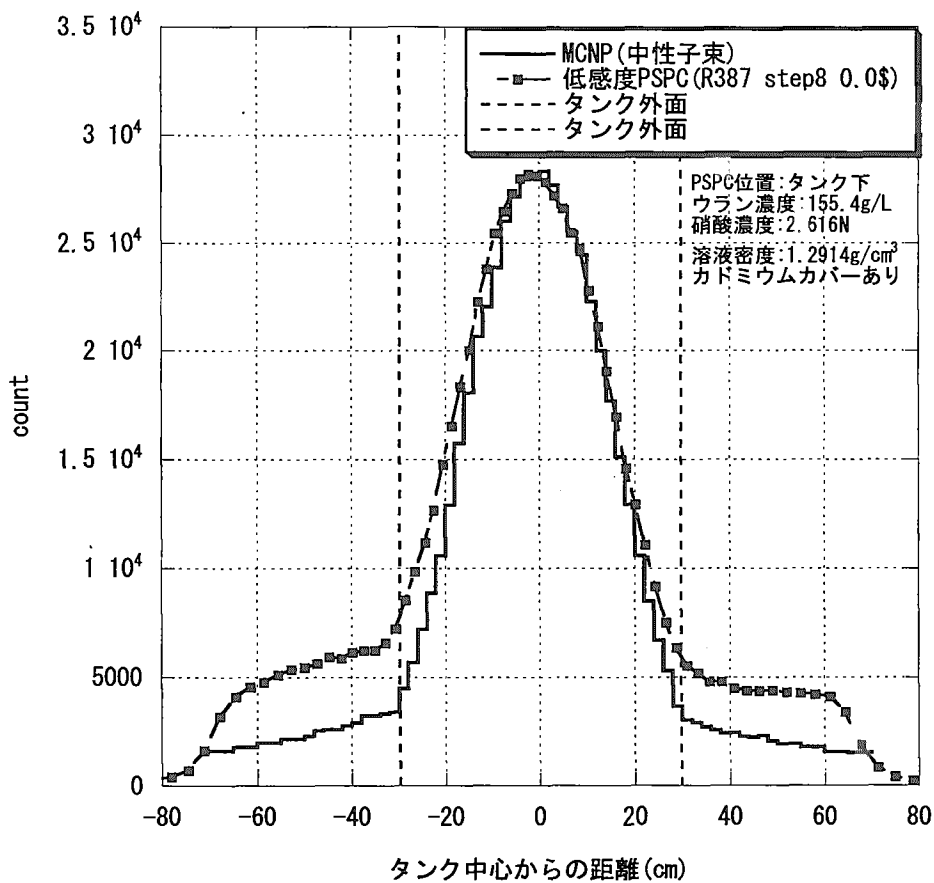


図 4.9 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値(R387)と
 MCNP 計算値 (中性子束) の比較
 (径方向分布)

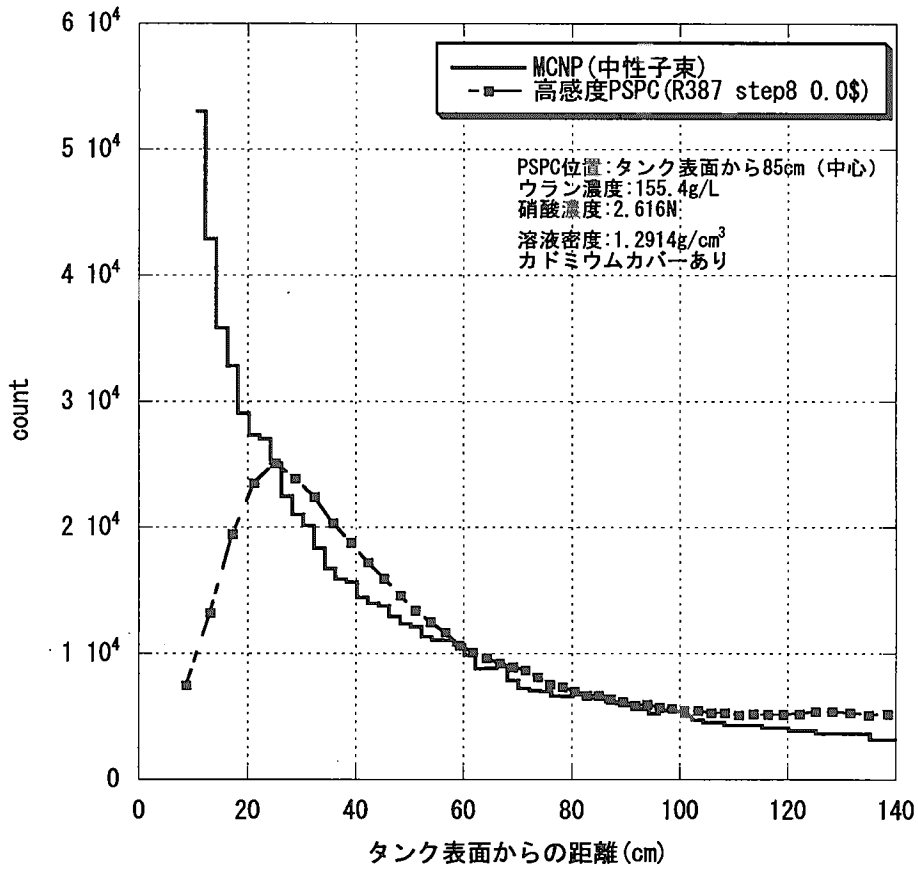


図 4.10 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値(R387)と
MCNP 計算値 (中性子束) の比較
(径方向分布)

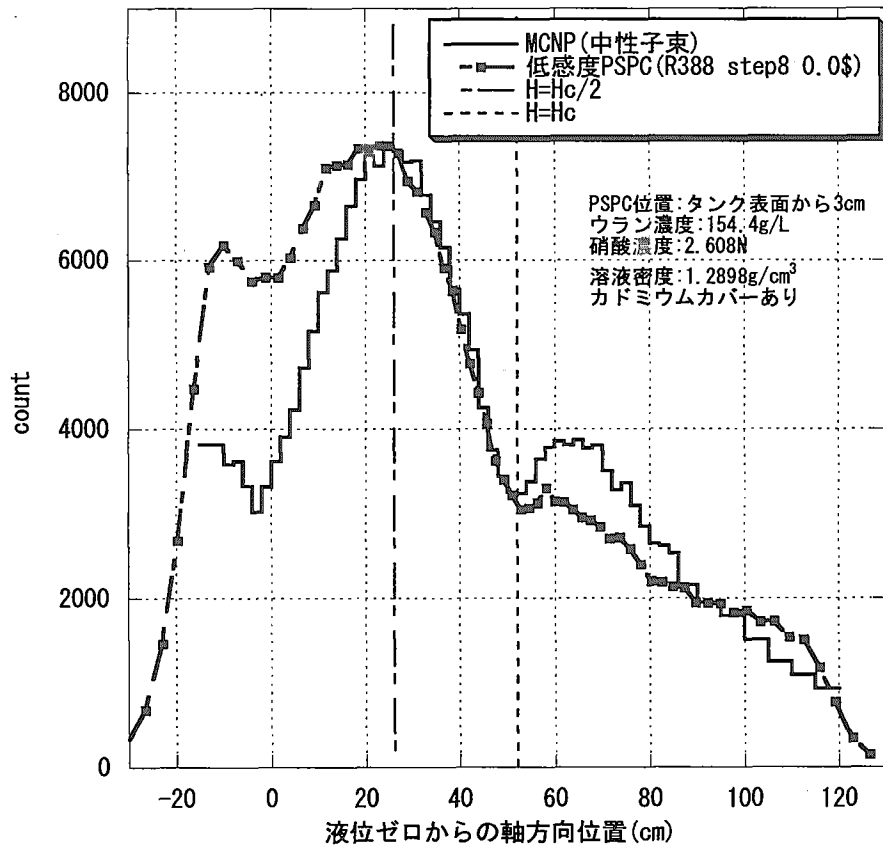


図 4.11 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値 (R388) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

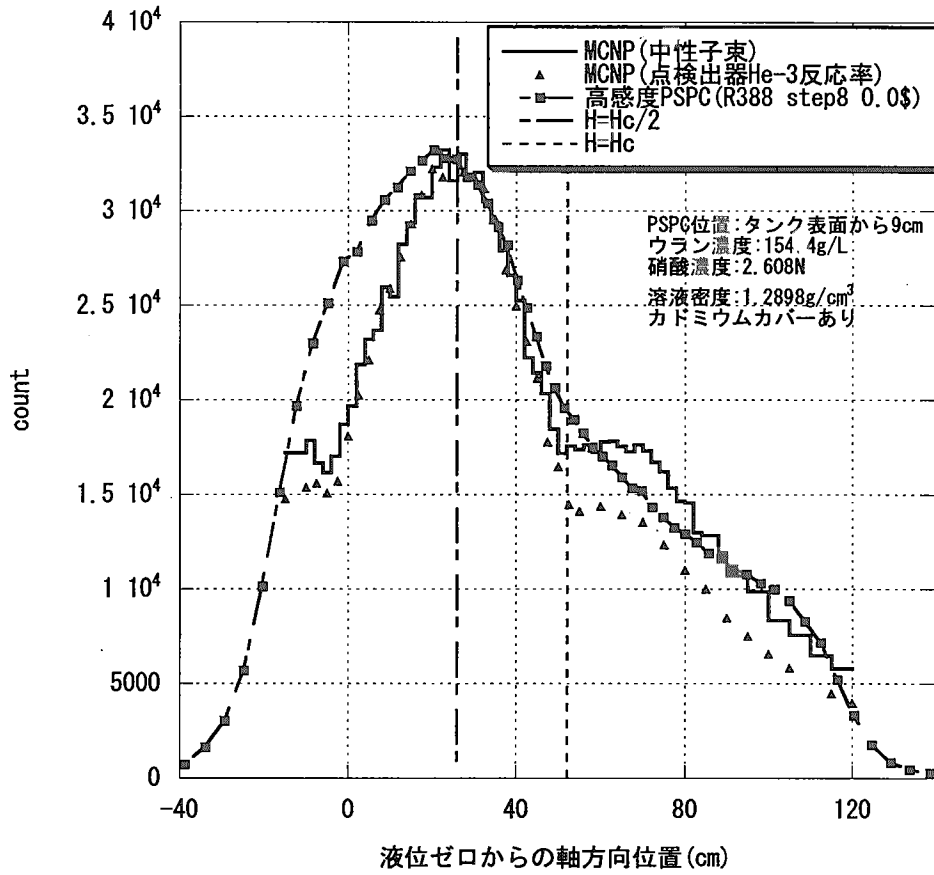


図 4.12 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値 (R388) と MCNP 計算値 (中性子束、³He 反応率) の比較

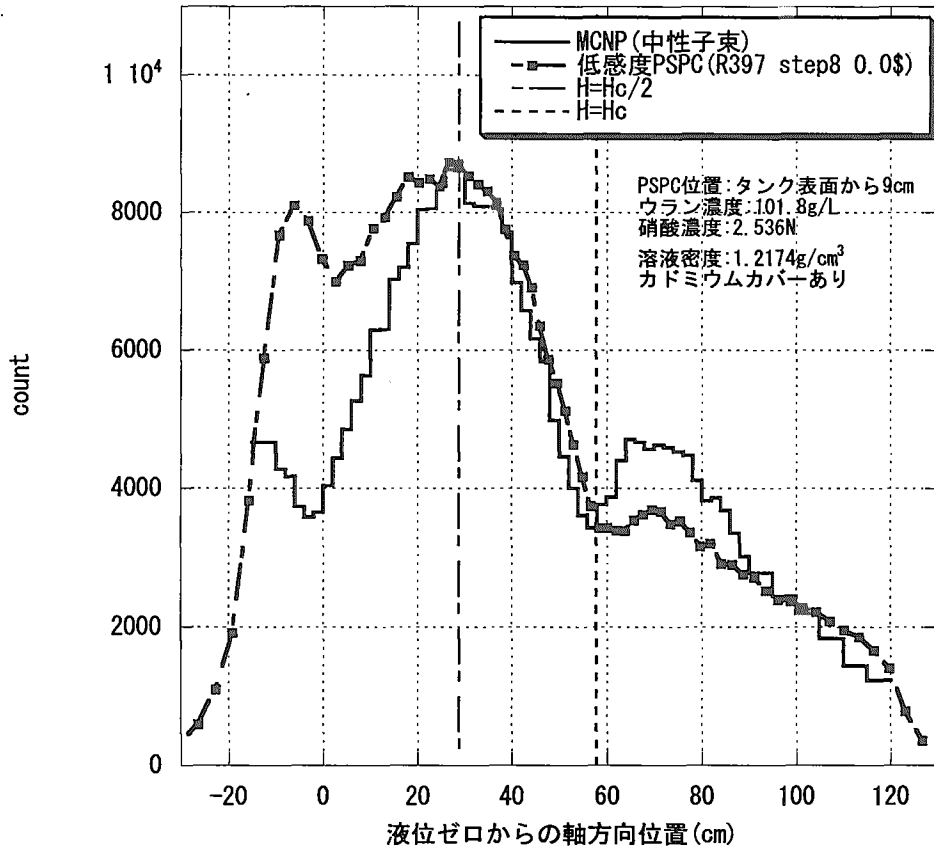


図 4.13 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値 (R397) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

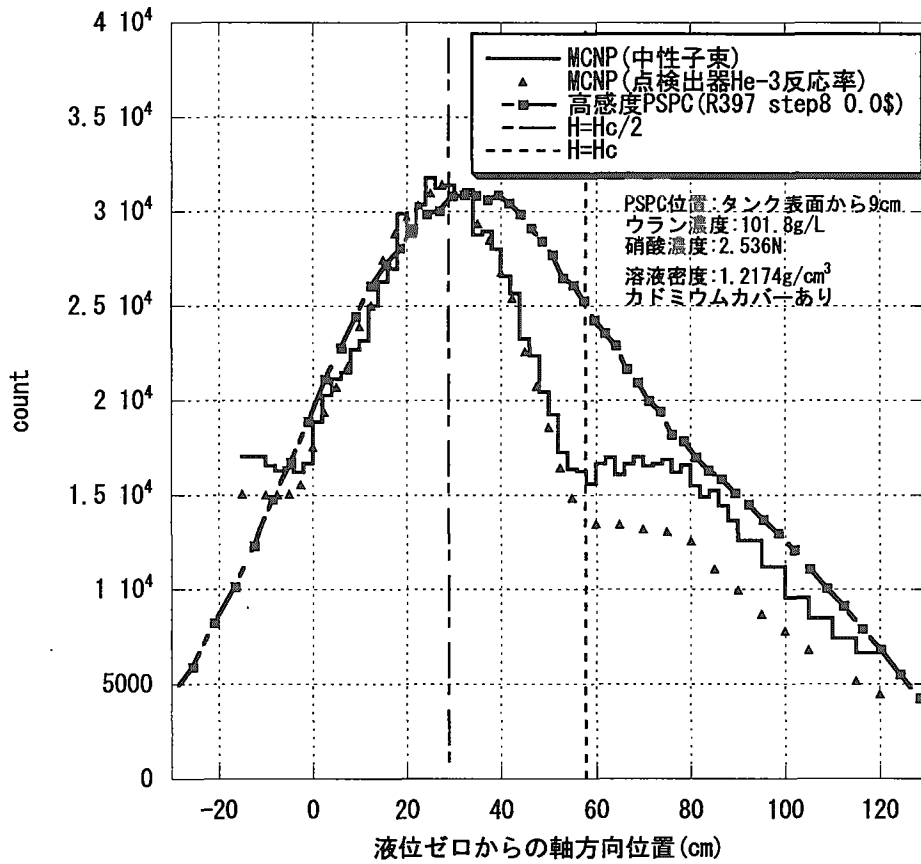


図 4.14 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値 (R397) と MCNP 計算値 (中性子束、³He 反応率) の比較

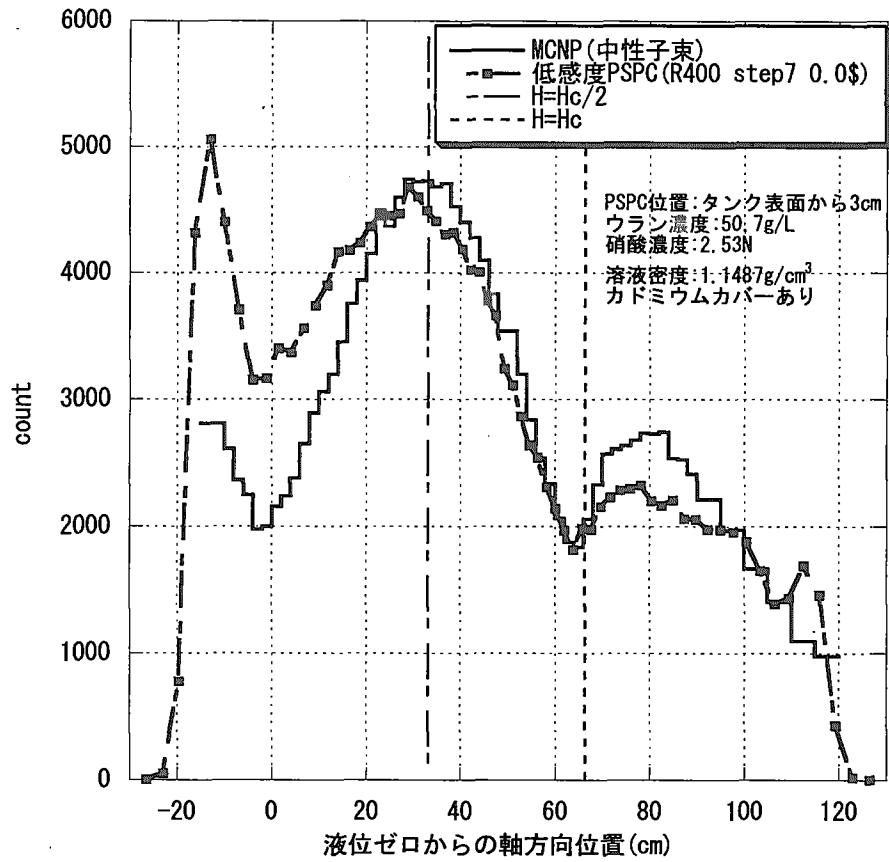


図 4.15 STACY 裸体系における低感度 PSPC 測定値 (R400) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

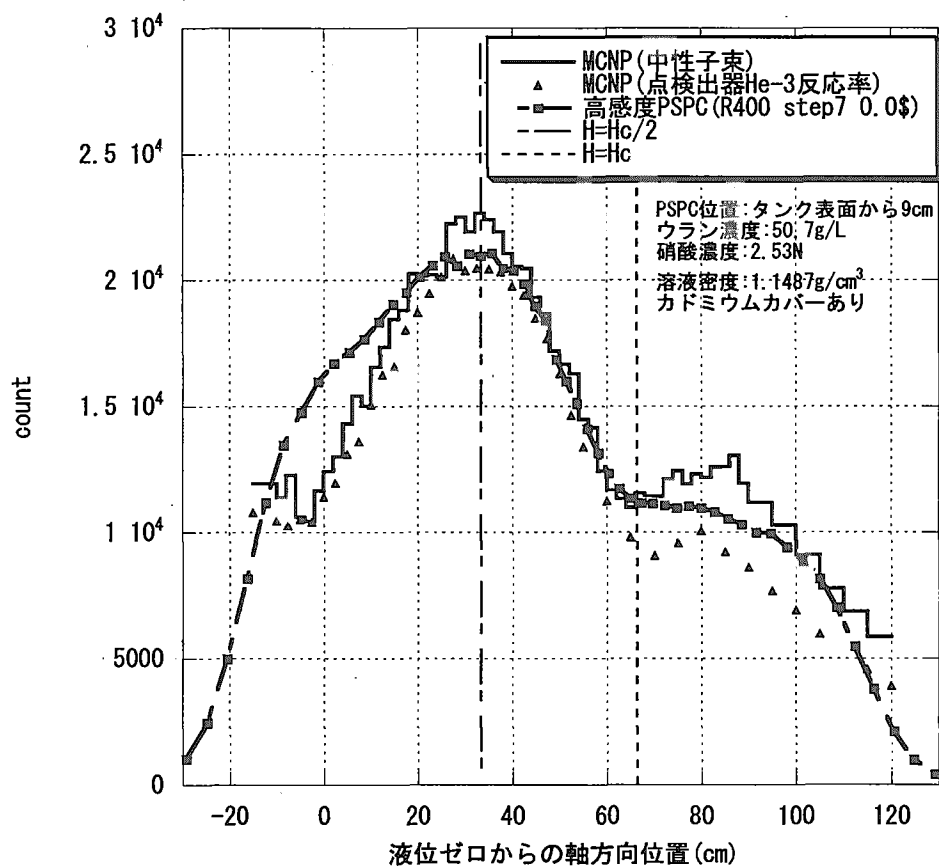


図 4.16 STACY 裸体系における高感度 PSPC 測定値 (R400) と MCNP 計算値 (中性子束、³He 反応率) の比較

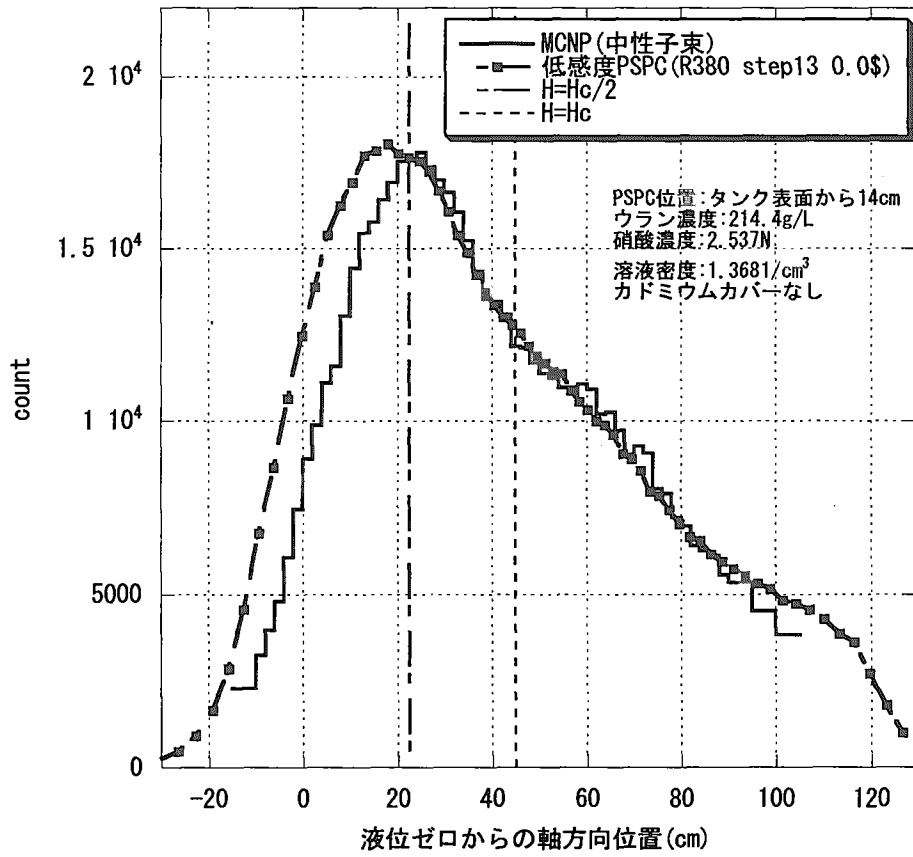


図 4.17 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R380)と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

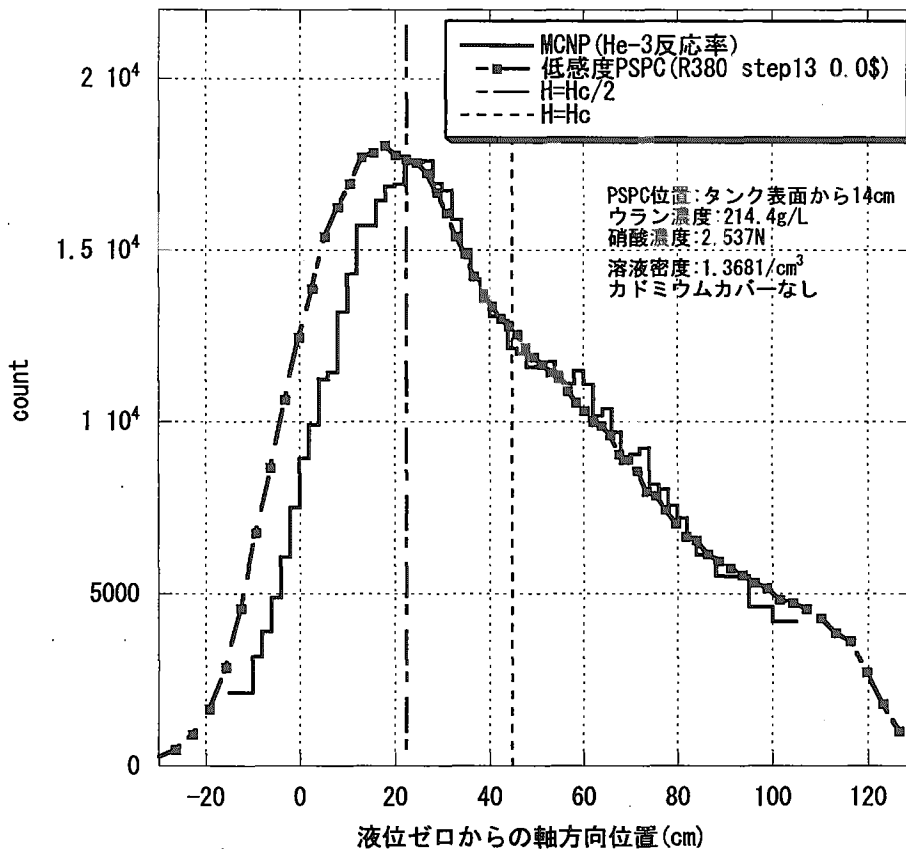


図 4.18 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R380)と MCNP 計算値 (³He 反応率) の比較

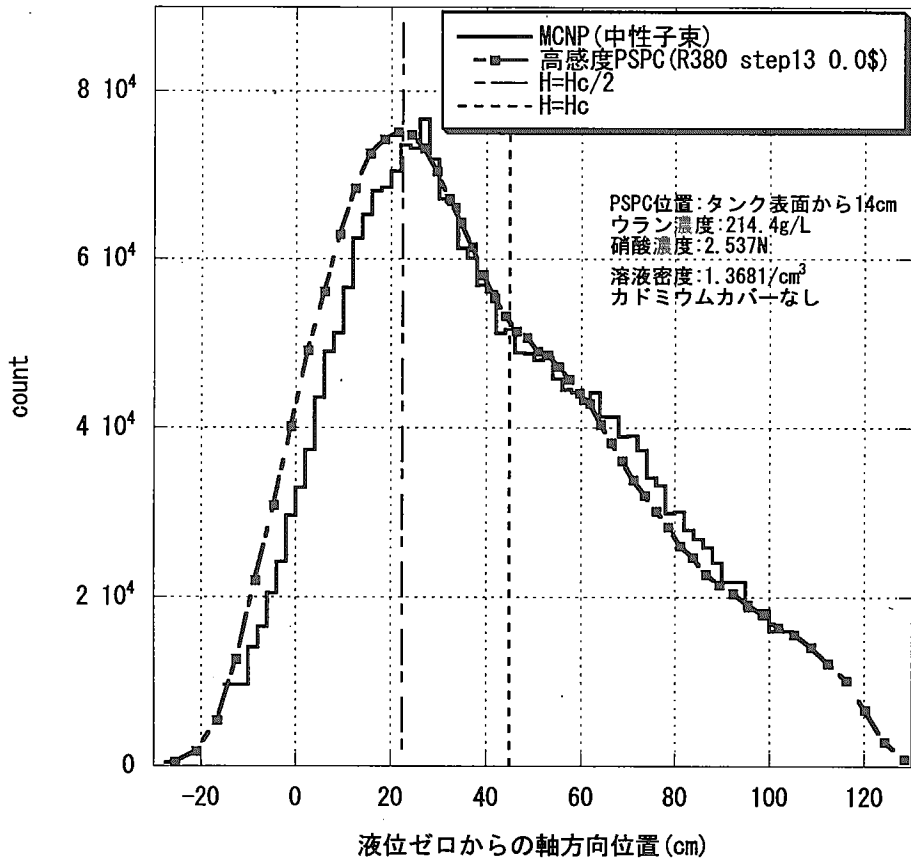


図 4.19 STACY 水反射体系における高感度 PSPC 測定値(R380)と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

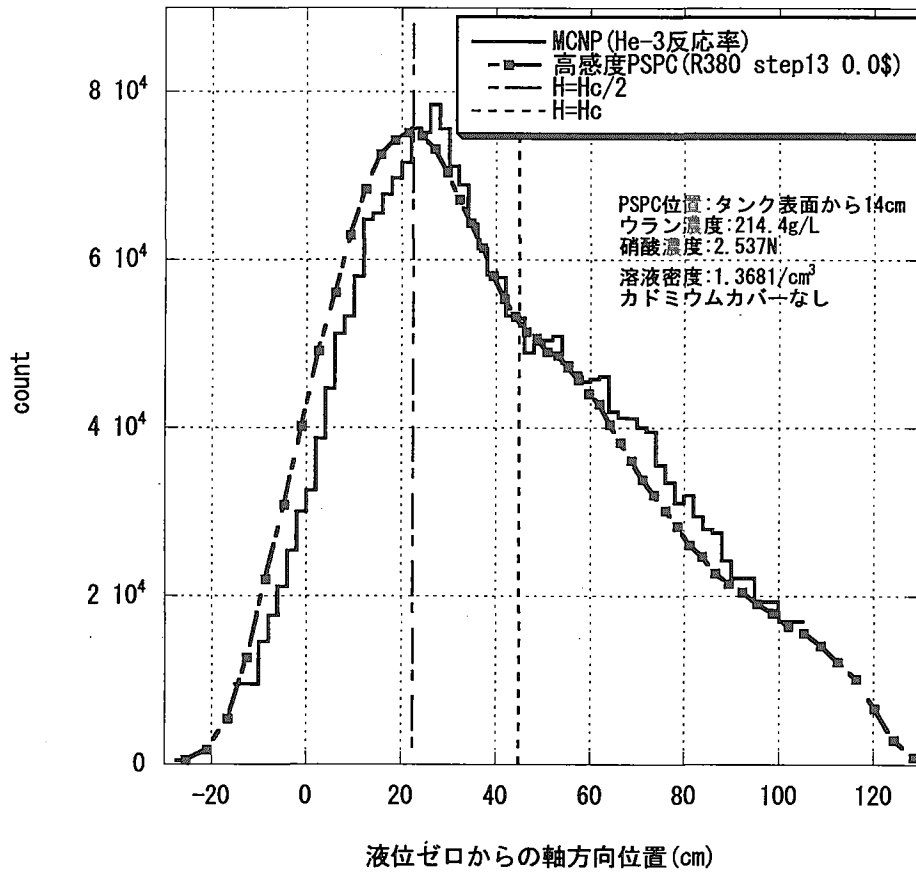


図 4.20 STACY 水反射体系における高感度 PSPC 測定値(R380)と MCNP 計算値 (³He 反応率) の比較

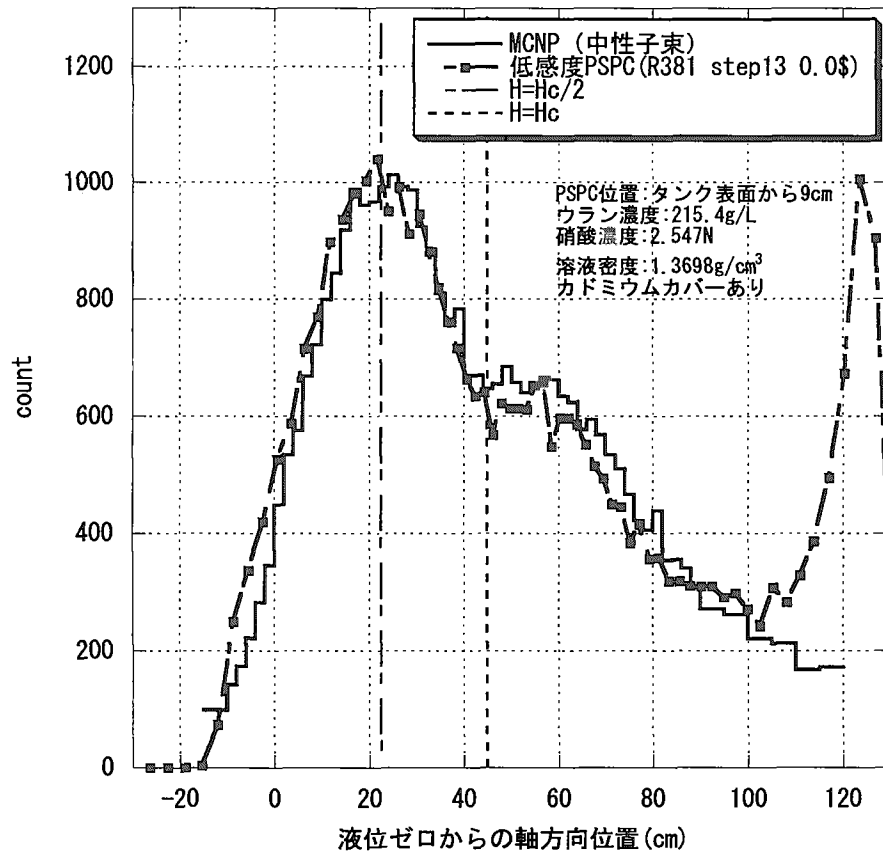


図 4.21 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R381) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

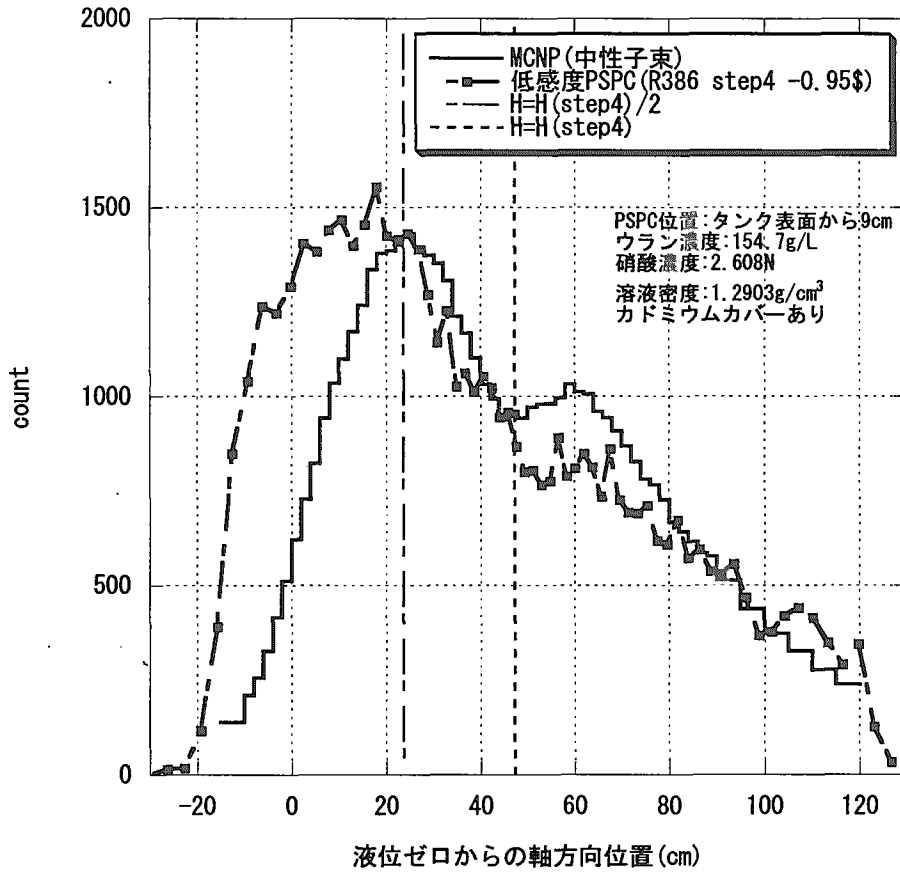


図 4.22 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R386) と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

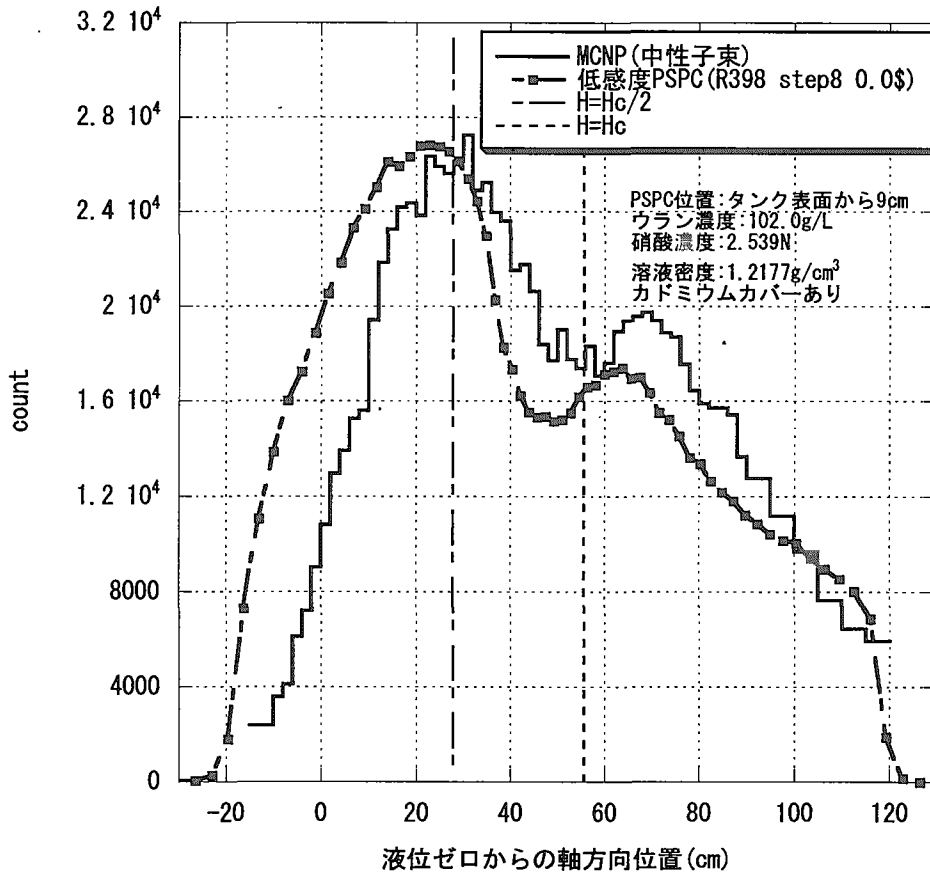


図 4.23 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R398)と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

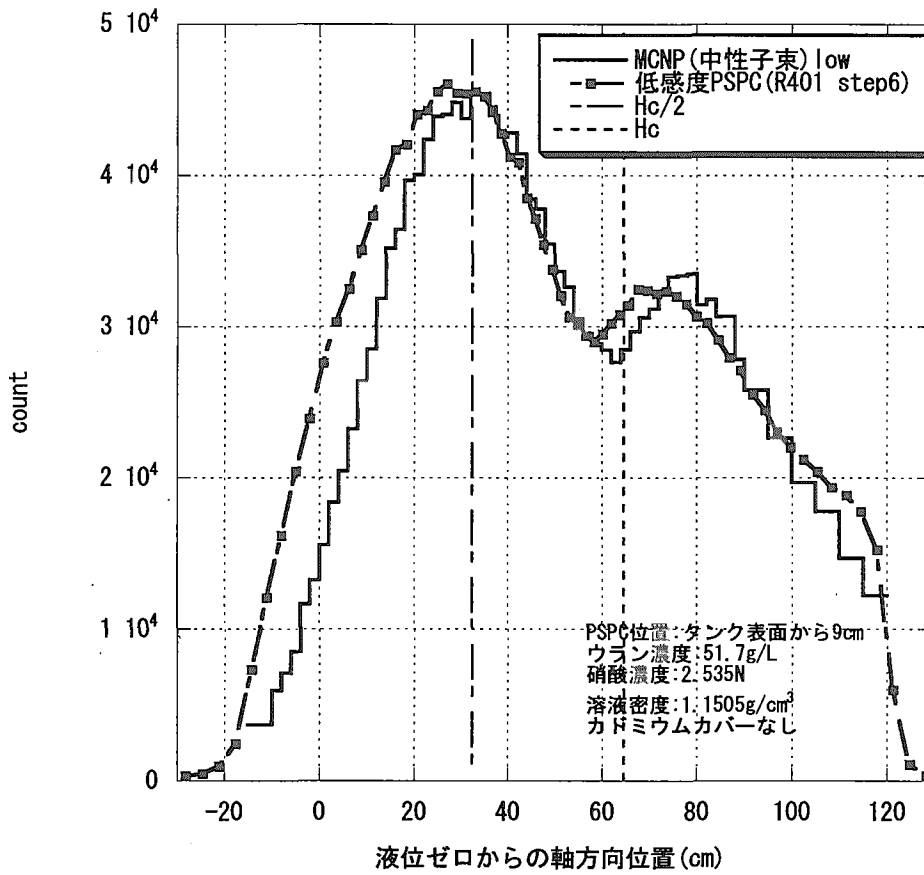


図 4.24 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R401)と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

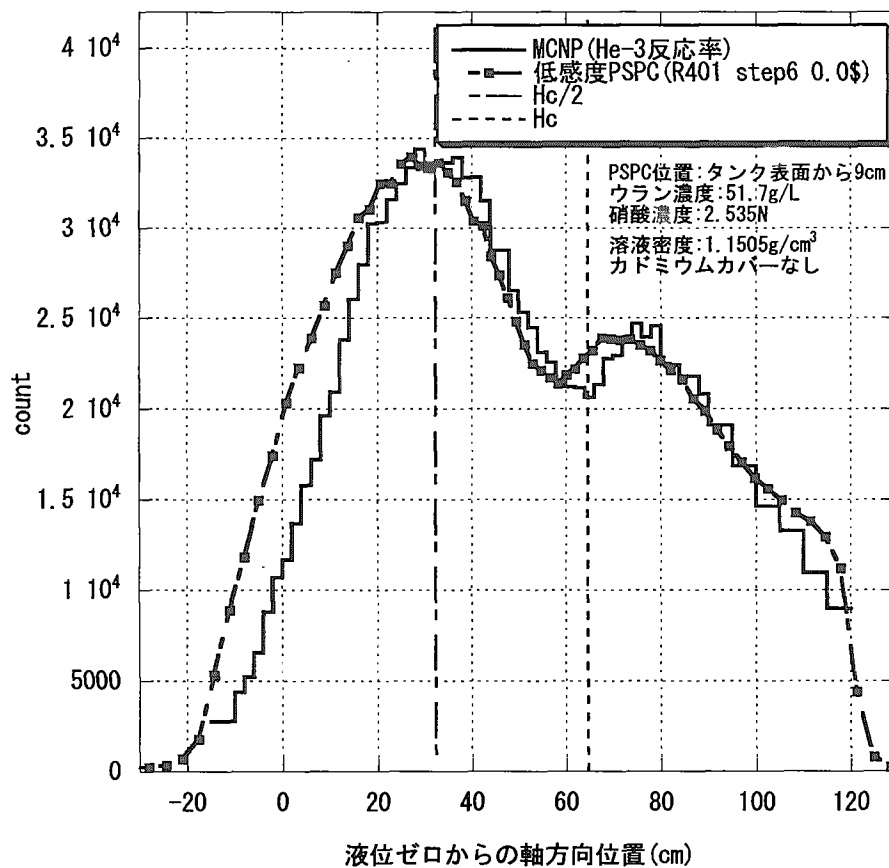


図 4.25 STACY 水反射体系における低感度 PSPC 測定値(R401)と MCNP 計算値 (³He 反応率) の比較

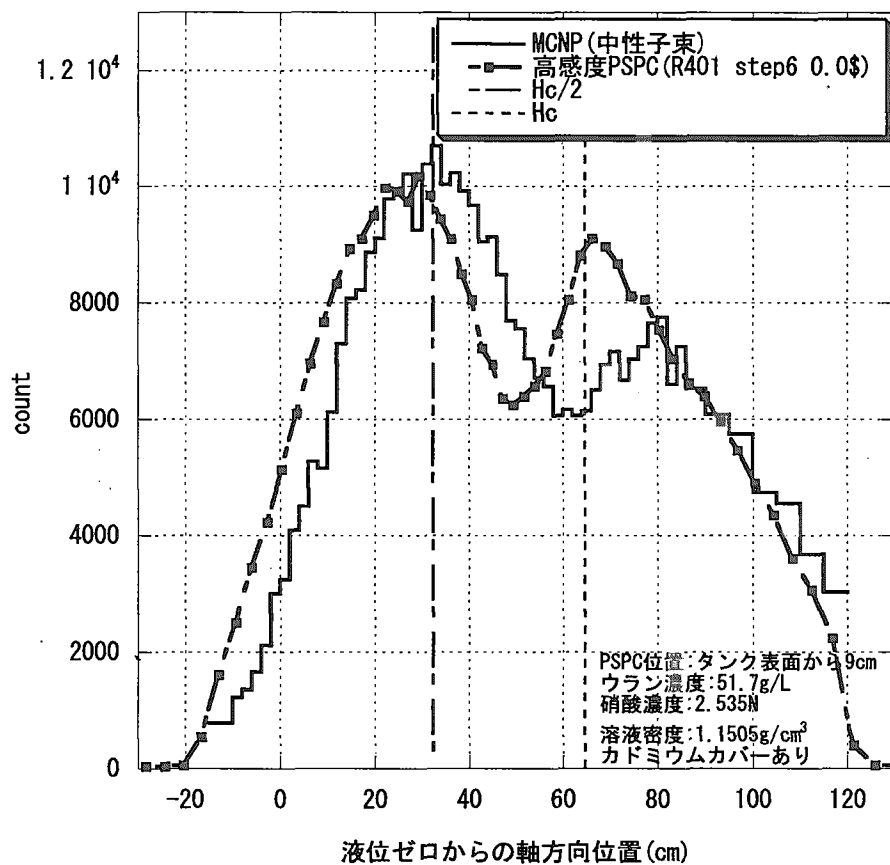


図 4.26 STACY 水反射体系における高感度 PSPC 測定値(R401)と MCNP 計算値 (中性子束) の比較

5. まとめと今後の課題

本報告書では、定常臨界実験装置 STACY600 ϕ 円筒非均質炉心において、PSPC により測定した炉心タンク外側の中性子束分布の測定データをまとめた。さらに、測定データと MCNP による計算値の比較を行った。

PSPC による中性子束分布測定においては、ほとんどのケースにおいて計数率を低下させて ADC のデッドタイムを減少することを目的として、PSPC にカドミウムを巻いた。しかし、PSPC 端部のカドミウムを巻くことが出来ない部分から検出器内に入射した中性子の影響により、臨界液位の半分の高さよりも下部の分布に歪みが生じた。PSPC にカドミウムを巻いていないケースでは、このような歪みは生じなかった。

PSPC によるパルス中性子実験における測定では、硝酸ウラニル溶液のウラン濃度 50g/L における裸体系及び水反射体系の即発中性子減衰定数 α 値を評価した。低感度検出器と高感度検出器によって評価された α 値を比較すると、両者は裸体系では 4%以内、水反射体系では 9%以内で一致した。

PSPC による中性子束分布測定値と MCNP による計算結果を比較すると、計算値は、測定値に対して、臨界液位の半分の高さより上部では概ね一致したが、それより下部では両者の差が大きくなった。これは、上述の PSPC の端部にカドミウムを巻いていないことによる現象が再現できなかつたためであると考えられる。PSPC にカドミウムを巻いていないケースでは、両者はよく一致した。

今後の測定においては、カドミウムを巻かずに測定が可能なり感度が低い PSPC を購入し使用する予定である。即発中性子減衰定数 α の測定については、他の検出器を用いた実験での測定値との間に 1 割前後の差があるため、測定回路及びフィッティング方法の再検討を行う予定である。また、MCNP による検証計算においては、分散低減法の使用等により、PSPC にカドミウムを巻いた場合の測定値であっても、その検証ができるような工夫をする予定である。

謝辞

中性子束分布測定実験においては、燃料サイクル安全工学部臨界安全研究室の山根祐一氏に、パルス中性子実験での即発中性子減衰定数 α の評価については燃料サイクル安全工学部臨界安全研究室の外池幸太郎氏に適切な助言をいただきました。ここに記して謝辞と致します。

参考文献

- 1) G. F. ノル著, 木村・阪井共訳: “放射線計測ハンドブック第2版”, 日刊工業新聞, 199, (1991)
- 2) J. F. Briesmeister, ed.: “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version 4C”, LA-13709-M (2000)
- 3) 小迫和明, 大山幸夫, 前川洋: “FSXLIB-J3R2 ; JENDL-3.2 に基づく MCNP 用連続エネルギー断面積ライブラリー”, JAERI-Data/Code 94-020 (1994)

付録

A.1 MCNP 計算における燃料及び構造材の原子個数密度

MCNP の計算において使用した原子個数密度を表 A.1.1～表 A.1.9 に示す。

表 A.1.1 硝酸ウラニル溶液の原子個数密度 (裸体系)

Run No.	383	388	397	400
ウラン濃度(g/L)	217.9	154.4	101.8	50.7
硝酸濃度(N)	2.570	2.608	2.536	2.53
密度(g/cm ³)	1.3739	1.2898	1.2174	1.1487
核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)			
H	5.8452e-02	5.9721e-02	6.0964e-02	6.2050e-02
N-14	2.6510e-03	2.3524e-03	2.0427e-03	1.7803e-03
O-16	3.7508e-02	3.6914e-02	3.6362e-02	3.5861e-02
U-234	2.8031e-07	1.9862e-07	1.3096e-07	6.5221e-08
U-235	3.3605e-05	2.3812e-05	1.5700e-05	7.8192e-06
U-236	5.5586e-08	3.9387e-08	2.5969e-08	1.2934e-08
U-238	5.1772e-04	3.6685e-04	2.4187e-04	1.2046e-04

表 A.1.2 硝酸ウラニル溶液の原子個数密度 (水反射体系)

Run No.	380	381	386	398	401
ウラン濃度(g/L)	214.4	215.4	154.6	102.0	51.7
硝酸濃度(N)	2.537	2.547	2.610	2.539	2.535
密度(g/cm ³)	1.3681	1.3698	1.2900	1.2177	1.1505
核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)				
H	5.8570e-02	5.8537e-02	5.9705e-02	6.0951e-02	6.2041e-02
N-14	2.6134e-03	2.6245e-03	2.3546e-03	2.0455e-03	1.7884e-03
O-16	3.7447e-02	3.7466e-02	3.6913e-02	3.6364e-02	3.5884e-02
U-234	2.7581e-07	2.7709e-07	1.9888e-07	1.3121e-07	6.6508e-08
U-235	3.3066e-05	3.3220e-05	2.3843e-05	1.5731e-05	7.9734e-06
U-236	5.4693e-08	5.4948e-08	3.9438e-08	2.6020e-08	1.3189e-08
U-238	5.0941e-04	5.1178e-04	3.6732e-04	2.4235e-04	1.2284e-04

表 A.1.3 燃料ペレットの原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
U-234	1.07540e-5
U-235	1.16899e-3
U-236	8.67511e-6
U-238	2.20127e-2
O-16	4.64718e-2

表 A.1.4 燃料棒被覆管の原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
C-12	4.27779e-5
Cr	8.50034e-5
Fe	1.49804e-4
O-16	3.18181e-4
Si	1.38261e-5
Zr	4.24876e-2
Sn-112	4.21774e-6
Sn-114	2.82632e-6
Sn-115	1.47838e-6
Sn-116	6.31792e-5
Sn-117	3.33941e-5
Sn-118	1.05357e-4
Sn-119	3.73510e-5
Sn-120	1.41708e-4
Sn-122	2.01321e-5
Sn-124	2.51760e-5

表 A.1.5 燃料棒上部端栓、燃料棒下部端栓、格子板の原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)		
	燃料棒上部端栓	燃料棒下部端栓	格子板
Cr	8.34855e-5	8.34855e-5	8.34855e-5
Fe	1.55457e-4	1.51218e-4	1.54280e-4
O-16	3.15714e-4	2.86116e-4	8.18062e-4
Zr	4.24382e-2	4.24451e-2	4.23155e-2
Sn-112	4.64339e-6	4.64984e-6	4.90673e-6
Sn-114	3.11155e-6	3.11587e-6	3.28801e-6
Sn-115	1.62758e-6	1.62984e-6	1.71988e-6
Sn-116	6.95551e-5	6.96517e-5	7.34998e-5
Sn-117	3.67642e-5	3.68152e-5	3.88492e-5
Sn-118	1.15989e-4	1.16150e-4	1.22567e-4
Sn-119	4.11203e-5	4.11774e-5	4.34524e-5
Sn-120	1.56008e-4	1.56225e-4	1.64856e-4
Sn-122	2.21638e-5	2.21946e-5	2.34208e-5
Sn-124	2.77167e-5	2.77552e-5	2.92886e-5

表 A.1.6 STACY 炉心タンクの原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)	
	タンク	上板
C	6.36154e-5	4.7336e-05
Si	1.19025e-3	1.0627e-03
Mn-55	1.27781e-3	1.1561e-03
P-31	2.77523e-5	4.3170e-05
S	2.97819e-6	2.9782e-06
Ni	8.25892e-3	8.3403e-03
Cr	1.66605e-2	1.6775e-02
Fe	5.94335e-2	5.9421e-02

表 A.1.7 水の原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
H	6.6658e-2
O-16	3.3329e-2

表 A.1.8 空気の原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
N	3.9016e-5
O-16	1.0409e-5

表 A.1.9 カドミウムの原子個数密度

核種	原子個数密度(atoms/barn/cm)
Cd	4.634024e-02

A.2 MCNP の固定源計算において線源の入力値とした $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ のスペクトル

MCNP の固定源計算において線源の入力値とした $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ のスペクトルを表 A.2.1 に示す。

表 A.2.1 MCNP の固定源計算において線源の入力値とした $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ のスペクトル

No.	エネルギー 下限 (MeV)	エネルギー 上限(MeV)	レサジー	中性子放出率 $\Delta B_0/(\ln E/E_0)$	中性子放出率 ΔB_0
1	4.14e-07	1.10e-01	1.25e+01	1.15e-03	1.44e-02
2	1.10e-01	3.30e-01	1.10e+00	3.04e-02	3.34e-02
3	3.30e-01	5.40e-01	4.92e-01	6.35e-02	3.13e-02
4	5.40e-01	7.50e-01	3.29e-01	8.56e-02	2.81e-02
5	7.50e-01	9.70e-01	2.57e-01	9.72e-02	2.50e-02
6	9.70e-01	1.18e+00	1.96e-01	1.09e-01	2.14e-02
7	1.18e+00	1.40e+00	1.71e-01	1.16e-01	1.98e-02
8	1.40e+00	1.61e+00	1.40e-01	1.25e-01	1.75e-02
9	1.61e+00	1.82e+00	1.23e-01	1.57e-01	1.92e-02
10	1.82e+00	2.04e+00	1.14e-01	1.95e-01	2.23e-02
11	2.04e+00	2.25e+00	9.80e-02	2.19e-01	2.15e-02
12	2.25e+00	2.47e+00	9.33e-02	2.41e-01	2.25e-02
13	2.47e+00	2.68e+00	8.16e-02	2.79e-01	2.28e-02
14	2.68e+00	2.90e+00	7.89e-02	3.74e-01	2.95e-02
15	2.90e+00	3.11e+00	6.99e-02	5.09e-01	3.56e-02
16	3.11e+00	3.32e+00	6.53e-02	5.64e-01	3.69e-02
17	3.32e+00	3.54e+00	6.42e-02	5.39e-01	3.46e-02
18	3.54e+00	3.75e+00	5.76e-02	5.32e-01	3.07e-02
19	3.75e+00	3.97e+00	5.70e-02	5.26e-01	3.00e-02
20	3.97e+00	4.18e+00	5.15e-02	5.22e-01	2.69e-02
21	4.18e+00	4.39e+00	4.90e-02	5.84e-01	2.86e-02
22	4.39e+00	4.61e+00	4.89e-02	6.50e-01	3.18e-02
23	4.61e+00	4.82e+00	4.45e-02	6.90e-01	3.07e-02
24	4.82e+00	5.04e+00	4.46e-02	7.47e-01	3.33e-02
25	5.04e+00	5.25e+00	4.08e-02	7.45e-01	3.04e-02
26	5.25e+00	5.47e+00	4.11e-02	6.67e-01	2.74e-02
27	5.47e+00	5.68e+00	3.77e-02	6.19e-01	2.33e-02
28	5.68e+00	5.89e+00	3.63e-02	5.67e-01	2.06e-02
29	5.89e+00	6.11e+00	3.67e-02	4.95e-01	1.82e-02

表 A.2.1 (続き) MCNP の固定源計算において線源の入力値とした $^{241}\text{Am}\text{-Be}$ のスペクトル

No.	エネルギー 下限 (MeV)	エネルギー 上限 (MeV)	レサジー	中性子放出率 $\Delta B_0/(\ln E/E_0)$	中性子放出率 ΔB_0
30	6.11e+00	6.32e+00	3.38e-02	5.23e-01	1.77e-02
31	6.32e+00	6.54e+00	3.42e-02	5.96e-01	2.04e-02
32	6.54e+00	6.75e+00	3.16e-02	5.79e-01	1.83e-02
33	6.75e+00	6.96e+00	3.06e-02	5.32e-01	1.63e-02
34	6.96e+00	7.18e+00	3.11e-02	5.39e-01	1.68e-02
35	7.18e+00	7.39e+00	2.88e-02	5.83e-01	1.68e-02
36	7.39e+00	7.61e+00	2.93e-02	6.42e-01	1.88e-02
37	7.61e+00	7.82e+00	2.72e-02	6.75e-01	1.84e-02
38	7.82e+00	8.03e+00	2.65e-02	6.37e-01	1.69e-02
39	8.03e+00	8.25e+00	2.70e-02	5.31e-01	1.44e-02
40	8.25e+00	8.46e+00	2.51e-02	3.85e-01	9.68e-03
41	8.46e+00	8.68e+00	2.57e-02	2.54e-01	6.52e-03
42	8.68e+00	8.89e+00	2.39e-02	1.78e-01	4.26e-03
43	8.89e+00	9.11e+00	2.44e-02	1.50e-01	3.67e-03
44	9.11e+00	9.32e+00	2.28e-02	1.67e-01	3.81e-03
45	9.32e+00	9.53e+00	2.23e-02	2.27e-01	5.06e-03
46	9.53e+00	9.75e+00	2.28e-02	2.74e-01	6.25e-03
47	9.75e+00	9.96e+00	2.13e-02	2.59e-01	5.52e-03
48	9.96e+00	1.02e+01	2.18e-02	2.14e-01	4.68e-03
49	1.02e+01	1.04e+01	2.04e-02	1.81e-01	3.70e-03
50	1.04e+01	1.06e+01	2.00e-02	1.39e-01	2.78e-03
51	1.06e+01	1.08e+01	2.05e-02	7.37e-02	1.51e-03
52	1.08e+01	1.10e+01	1.92e-02	1.89e-02	3.63e-04
53	1.10e+01	1.11e+01	5.42e-03	0.00e+00	0.00e+00

引用元 International Organization for Standardization, "Neutron reference radiations for calibrating neutron-measuring devices used for radiation protection purposes and for determining their response as a function of neutron energy", ISO 8529 pp.11, 1989

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
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	ジーメンズ	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	
光照射度	ルーメン	lm	cd·sr
照射線量	ルクス	lx	lm/m ²
放射線量当量	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 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ 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	b
バール	bar
ガリ	Gal
キュリー	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 b = 100 fm² = 10⁻²⁸ m²
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

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, 1 eV および 1 u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

粘度 1 Pa·s (N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))
動粘度 1 m²/s = 10⁴ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
力	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 = 4.18605 J (計量法)
= 4.184 J (熱化学)
= 4.1855 J (15 °C)
= 4.1868 J (国際蒸気表)
仕事率 1 PS (仏馬力)
= 75 kgf·m/s
= 735.499 W

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

STACY非均質中心における位置検出型比例計算による中性子束分布の測定と解析(一)(愛媛大学)

R100

五紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。