

解 説 (I)

原研 JMTRにおける中性子ドシメトリーの現状と課題

(日本原子力研究所) 石塚悦男、島川聡司

1. はじめに

JMTRは、各種燃料及び材料の照射専用炉として 1969年に運転を開始してから現在に至るまでに、キャプセルにして延べ3千本の照射試験を行った。これらの照射試験から取得した中性子照射データは、基礎研究をはじめとして、軽水炉、高温ガス炉及び核融合炉等の各研究分野で有効に利用されている。近年の照射試験では、原子力研究開発も成熟期に達したこともあり、より高度化、多様化しており、中性子照射量は勿論のこと、中性子スペクトルや照射速度(中性子束レベル)等を重視した照射試験も行われるようになった。これに伴い、利用者への照射情報についても更に充実することが望まれる様になり、種々の検討及び改善をはじめたところである。本解説ではJMTRにおけるドシメトリーの現状について述べるとともに、今後の計画等についても紹介する。

1.1 JMTRの概要

JMTRは、定格熱出力50MW、軽水減速・冷却タンク型原子炉である¹⁾。JMTRの炉心配置図を図1に示す。炉心燃料領域は標準燃料要素22本、燃料フォロー付き制御棒5本で構成されており、その領域をベリリウム反射体及びアルミニウム反射体が層状に取り囲こんでいる。炉心部には、各反射体に約160個の照射孔が設けられており、照射試料はキャプセルに入れた後に照射孔に装荷される。また、その他にループ装置及び水力ラビット等の照射装置も設置されている。

代表的な熱中性子束及び高速中性子束分布を図2に示す。なお、図には示していないが、照射孔内部の熱中性子束分布はキャプセル構造材料に影響を受けて複雑な分布となっている。この様な炉心構造の複雑さは精度の良いドシメトリー、特に熱中性子に関するドシメトリーの大きな障壁となっている。

1.2 照射試験におけるドシメトリーの役割

照射試験におけるドシメトリーは、核的な照射環境の情報提供である。照射試験で必要とされる照射情報には以下の様なものが挙げられる。

(1) 燃料の照射試験

- ・熱中性子束

- ・核発熱率（主に核分裂反応率）
- ・燃焼度

(2) 材料の照射試験

- ・高速中性子束、照射量
- ・熱中性子束、照射量
- ・中性子スペクトル
- ・はじき出し損傷率
- ・ガス生成率
- ・核発熱率（主に γ 加熱率）
- ・各種反応率や反応生成物の量、誘導放射線量

以上のように、燃料の照射試験では核分裂反応に集中した要望が多く、材料照射試験では照射目的の多様さから、要望される情報は多岐にわたっている。ここでは、主に材料照射試験を中心にして述べることにする。

JMTRのドシメトリーの特徴としては、中性子束やスペクトルの変動を正確に評価することが重要となる。例えば、運転サイクル毎のキャプセル引抜・挿入及び燃料の燃焼に伴う制御棒駆動により生じる出力分布変化や中性子束分布変化の影響、キャプセルの構造や照射温度の影響等が変動要因として挙げられる。また、必要なドシメトリー情報は、ドシメトリーモニタ位置の値でなく照射試料位置の値であるため、試料位置での照射量推定も重要となる。

2. 中性子ドシメトリーの現状

JMTRにおけるドシメトリーの研究は、JMTR本体及びJMTRC（JMTRの炉心を模擬した臨界実験装置）を利用して行われてきた²⁻⁴⁾。ドシメトリーの現状と計画を図3に示す。箔放射化法を用いた中性子照射量の測定については、JMTRの運転開始当初から行われており、高速中性子照射量（ $E > 1.0$ MeV）及び熱中性子照射量測定には、それぞれ純鉄及びコバルト含有合金のフルエンスモニタを用いている。フルエンスモニタの種類及び形状を図4に示す。各種モニタ材及びケースはキャプセルの使用温度で使い分けており、数本単位でキャプセルに取り付けられる。照射試験終了後のモニタ材は数ヶ月の冷却期間を経て、 γ 線スペクトロメトリにより放射化反応率を定量し、モニタの実効断面積を用いて中性子照射量を算出している。

2.1 中性子照射量の測定

(1) 高速中性子照射量

従来、試料位置における高速中性子照射量は、キャプセルの同一水平断面上の試料の

両側にフルエンスモニタを2本以上配置し、個々のフルエンスモニタの照射量から内挿して推定していた。最近では、任意の試料位置における照射量情報の要望に答えるために、フルエンスモニタを多数装荷したキャプセル（以後「FMキャプセル」と記述する）を利用し、キャプセル内部の任意位置における高速中性子照射量の推定精度を調べた。

FMキャプセルの高速中性子照射量の測定結果を図5に示す。キャプセル水平断面では高速中性子照射量分布がほぼ一次平面で近似できることから、同一面上に3個以上のフルエンスモニタを配置すれば任意位置での高速中性子照射量推定が十分可能であること、さらに図4に示す様に、上下に2個を追加して計5個のフルエンスモニタを配置すれば高速中性子照射量の3次元分布を関数で表わすことが可能であること、が明かとなった。現在、この3次元分布関数の提供方法について検討している。

(2) 熱中性子照射量

熱中性子照射量分布は、キャプセル構造材の中性子吸収や散乱、体系温度に影響されるため、フルエンスモニタの測定値から照射試料位置の照射量を直接的に求めることが極めて困難である。このため現在は、照射試料近傍の熱中性子照射量分布の情報として、SRACコードを用いて計算したキャプセル内半径方向の熱中性子束分布を参考として提供するにとどめている。

2.2 中性子スペクトルの測定

従来は、JMTRCの各反射体層における中性子スペクトルをマルチフォイル法で測定し、この中性子スペクトルを「層依存スペクトル」として提供してきた。高速中性子領域のスペクトルに関しては、この層依存で十分精度があることが確かめられている。しかし最近では、熱中性子領域を含んだ照射試料位置での中性子スペクトルの要求が高まってきたため、そのような中性子スペクトルを提供するための検討を行った。検討の結果、中性子スペクトルの提供は2つの段階に分けて進めることにした。第一段階はフルエンスモニタを用いて中性子スペクトルを求める方法（「FMスペクトル法」と記述する）であり、第二段階はマルチフォイルを用いて求める方法である。

FMスペクトル法を概念を図6に示す。フルエンスモニタを用いる方法は、はじめにキャプセル構造をモデル化し、熱中性子領域のスペクトルをSRACコードで、高速中性子領域のスペクトルをANISNコードで計算して両スペクトルを結合させ、次に、この中性子スペクトルをフルエンスモニタで測定した熱及び高速中性子照射量で規格化し、面積保存（実際には反応率のエネルギー積分量保存）でスムージング化して中性子スペクトルを求める方法である。この方法による照射試料位置の中性子スペクトルの提供は昨年から行っている。

マルチフォイル法は、各エネルギー領域でしきい反応を起こす数種類のフォイル又は

ワイアを組み合わせ、核計算から求めた中性子スペクトルをアジャストメントする手法である。このため、使用できる核種の選定を行った。この結果を図7に示す。核種の選定に当たっては、照射キャプセルの取りだしに数カ月を要するため、比較的半減期が長いものを対象とした。また、形状は放射化量や照射キャプセルへの装荷のしやすさ等から直径1mm以下のワイア形状にした。今後は、ワイアの照射試験及び照射キャプセルを模擬した詳細な核計算を行い、最小限の数量で測定精度の高いワイアの組み合わせ等を調べる予定である。しかし、JMT Rでマルチフォイル法を行う場合には、臨界実験装置内の中性子スペクトルを測定する様な実験室レベルの測定が出来ない上、半減期等の制約を受けて有効な核種が使えない等の理由から、マルチフォイル法で得た中性子スペクトルを直接提供するには幾つかの解決すべき問題がある。また、照射試料位置での中性子スペクトルを提供するためには、結局のところ核計算に頼らざるを得ない事も事実である。このため、実際に提供するサービスの形態については更に検討が必要である。

2.3 その他の照射情報

照射試験によっては、前述した中性子の情報のみならず、中性子と構成原子の相互作用による核反応生成物の情報や、 γ 線の構成原子によるエネルギー変換（発熱）の情報等が必要となる。

核反応生成物に関しては、照射目的によって対象生成物が異なるため、定常的なサポートは実施できない状況にあり、希望に応じて中性子スペクトルの提供を実施している。ここでは、参考として、JMT R Cを用いた炭酸リチウム照射試験の結果（図8）⁶¹とJMT Rでのベリリウム照射試験についての結果（表1）⁶²を示す。いずれの実験においても、トリチウム生成量等の評価は中性子スペクトルを考慮して詳細なモデル計算を行えば実測値と良く一致している。

γ 線による核発熱（ γ 加熱率）は、JMT Rにおけるカロリメータ法及びJMT R Cを用いた TLD 法による実験が過去に行われており、それらの結果から照射孔別の γ 加熱分布を求めている。 γ 加熱は、物質依存となるため鉄（Fe）に対する値として提供している¹¹。また、 γ 線のエネルギースペクトルは RADHEAT-ANISNコードを用いて計算されている。

2.4 核計算による支援と位置付け

JMT Rでは、照射試料の希望中性子照射量を満足するために、また、炉心配置の安全性を確認するために、各運転サイクルに対して事前に核計算を行いチェックしている。

後者に関しては本稿のテーマ外であるため割愛するが、前者は、単なる中性子照射量の計算予測にとどまらず、キャプセルの照射孔決定及び照射試験の安全性確認、更に照

射試験に必要とされる詳細な解析を支援するための計算も含まれる。

予測計算は希望照射条件を満たすための照射孔を見い出すために実施しているが、希望照射条件を満たした照射計画を立案するまでの期間が制限されているため、機動性に富み精度の良い予測計算が必要となる。このため、中性子照射量や反応生成物（RI製造等）の計算予測は、物理的整合性よりも工学的信頼性を重視するためにバイアスファクタを導入している。

核計算による推定は、測定の質的及び量的な情報を補完するため、物理的整合性が重要となる。例えば、実効断面積や平均断面積の算出、中性子照射量測定点間の内挿、エネルギースペクトル情報の評価、はじき出し損傷率（dpa）やガス生成量といった損傷パラメータの算出などがその対象になる。

3. ドシメトリーの精度向上

ドシメトリーの精度を向上させるためには、核計算手法及びモデル化の検討、新しい核データライブラリの切り替え、照射済データの検討とデータベース化等が挙げられる。

核計算手法に関しては、現在はSRACやANISN等の核計算コードを用いているが、炉心計算は機動性を重要視して中性子4群の2次元モデルによる拡散コード（CITATION）を使用している。核計算の精度を向上させるためには、炉心計算モデルを2次元から実際の炉心に近づける3次元に拡張し、キャプセルや照射試料の構造も実際の形状に近付けること、また、近年盛んに利用されている連続エネルギーモンテカルロコード（MCNP）や多次元輸送コード等の採用が有効と考えられるが、熱中性子領域までを含めた詳細な計算を行うと膨大な計算量となる問題が残る。この点に関しては計算機能力の進展を見極めながら、それらの採用について検討したいと考えている。

核データライブラリに関しては、主にENDF/B-IVを使用しているが、順次JENDL-3への移行を計画している。しかし、ドシメトリーの精度向上に関しては、一部の核種を除いて精度向上に大きな効果を与えないと考えている。

照射済データの検討とデータベース化に関しては、フルエンスモニタを用いた中性子照射量のデータ等多くの照射データがある。しかし、現状の核計算ではバイアスファクタの統計データとしてのみ使用されている以外は検討されていない。上述の詳細な核計算を行えば更に利用価値のあるデータベースとして使える可能性がある。

中性子スペクトルに関しては、前述の通りマルチフォイル法で測定を計画しているが、実験室レベルの繊細な実験が困難な上、モニタ挿入による中性子場の擾乱などの必然的な誤差を含むことになる。また一方で、理想的な計算システムの構築が可能であれば実測を上回る精度の実現が可能と予想される。従って、JMTRで測定した中性子スペクトルは計算モデルの実証と誤差評価にとどめて、将来的には、特殊な場合を除き、改良

した核計算による試料位置の中性子スペクトルを提供することを考えている。また、実際の中性子スペクトルの提供においては、スペクトルデータをフロッピー等の媒体を通じて提供する方法についても検討している。

これまで材料照射効果に係わる損傷パラメータとして高速中性子照射量が長年用いられてきたが、近年、中性子スペクトルを考慮したはじき出し損傷率 (dpa) やガス生成量 (He や H)、または He/dpa 比等が新しいパラメータとして採用されている。また、速度論からみた dpa/s や中性子束、高速/熱中性子束比、自由点欠陥生成、等の提案がされている。これらの研究の展開に対応しうる計算システムの構築を目指して行く必要がある。

4. まとめ

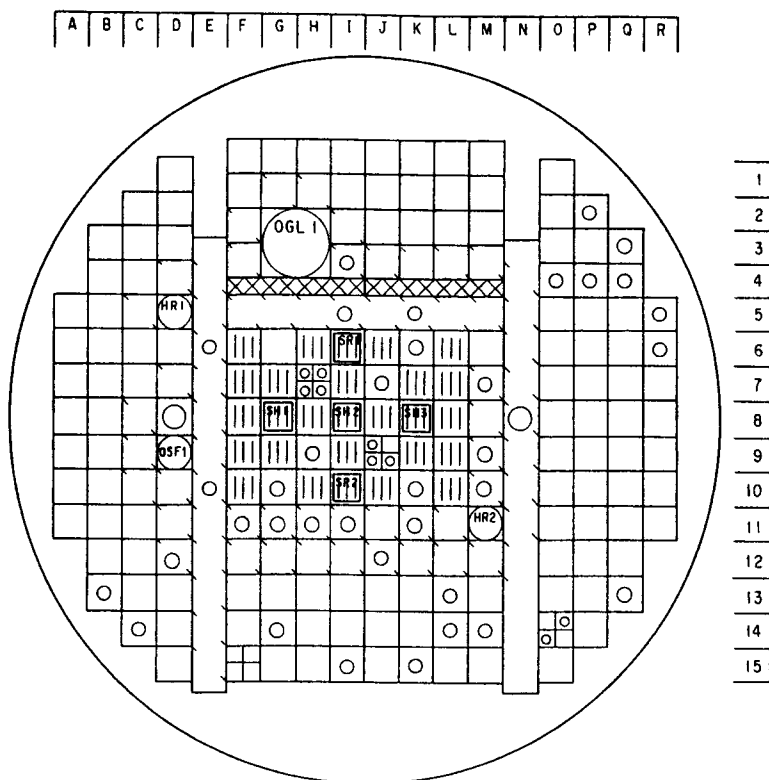
JMTRの照射試験におけるドシメトリーには、核計算システムの整備をはじめとして、熱エネルギー領域を含む中性子スペクトルの問題等多くの問題が累積している。今後は、内外の協力を得てこれらの課題について迅速に対応し、より精度の高いデータを提供できるように検討を進める所存である。

謝 辞

本解説をまとめるに際し、日本原子力研究所 大洗研究所 材料試験炉部 計画課の永岡芳春氏及び小森芳廣氏にご指導を頂いた。以上記して謝意を表わします。

参考文献

- 1) 日本原子力研究所、“JMTR 照射ハンドブック”，JAERI-M 83-053 (1983).
- 2) I. Kondo and K. Sakurai, J. Nucl. Sci. Tech., 18, No.6 (1981) 461.
- 3) K. Sakurri, Nucl. Instrum. Methods, (1983) 359.
- 4) 桜井文雄、新保利定、日本原子力学会誌, 25, No. 5 (1983) 372.
- 5) S. Shimakawa, H. Ando and M. Saito, "Present Status of Neutron Dosimetry in the JMTR", Second Asian Symposium on Research Reactor, Jakarta Indonesia (1989).
- 6) 島川聡司、石塚悦男、斎藤 実、JAERI-M 92-174 (1992).



- | | |
|--|---|
|  Fuel Element |  In-pile Loop, Hydraulic Rabbit, Shroud Facility |
|  Control Rod with Fuel Follower |  In-Core Capsule |
|  Beryllium reflector | |
|  Aluminum reflector | |

図1 J M T R の 炉 心 配 置 図

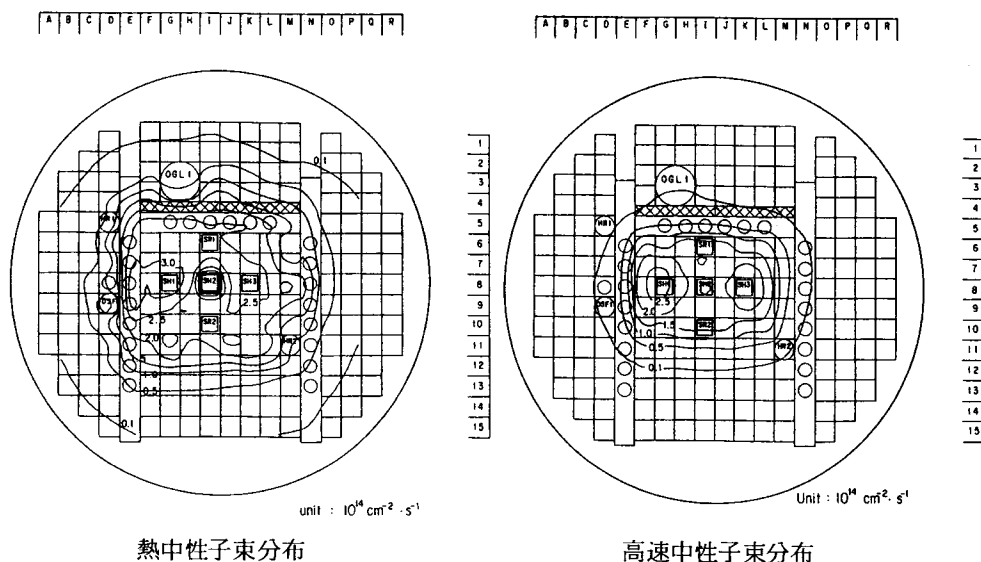


図2 熱及び高速中性子束分布図

年 項目	燃料	68~86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96
		HEU	MEU				LEU					
熱, 高速中性子照射量		Fluence Monitor										
層依存スペクトル		MTRC										
Dpa 評価												
LEU化の検討												
FMスペクトルの検討												
FMスペクトルの提供												
スペクトルの検討												
スペクトルの測定												
スペクトルの提供												

図3 ドシメトリーの現状と計画

エネルギー	核反応	材質	用途
高速中性子 (1.0MeV以上)	$^{54}\text{Fe}(n,p)^{54}\text{Mn}$	Fe	低高温
熱中性子 (0.68eV以下)	$^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$	Al-Co*	低温
		Ti-Co*	高温
		V-Co*	高温

※Co含有量(1~0.17%)

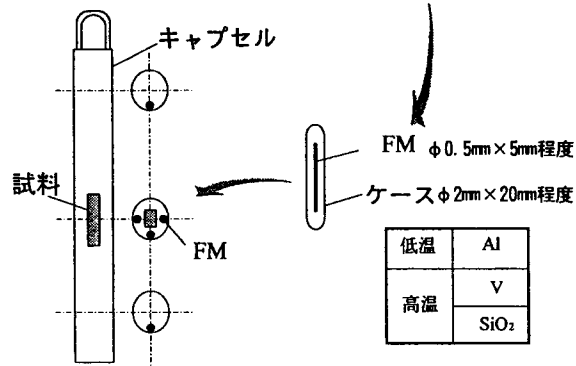


図4 フルエンスモニタの種類及び形状

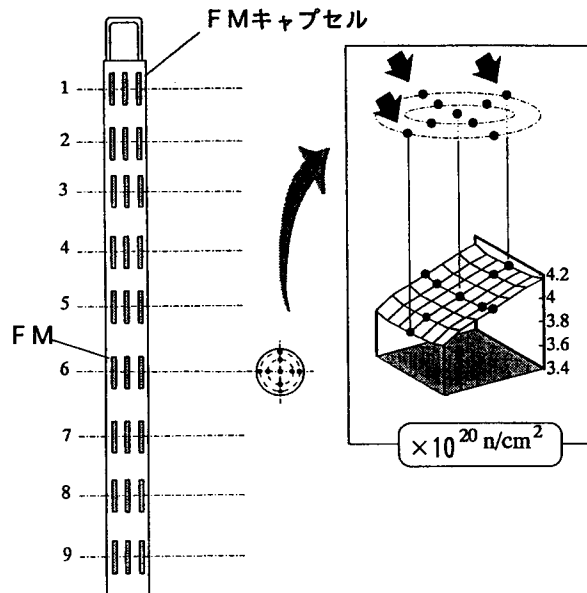


図5 高速中性子照射量の3次元表示

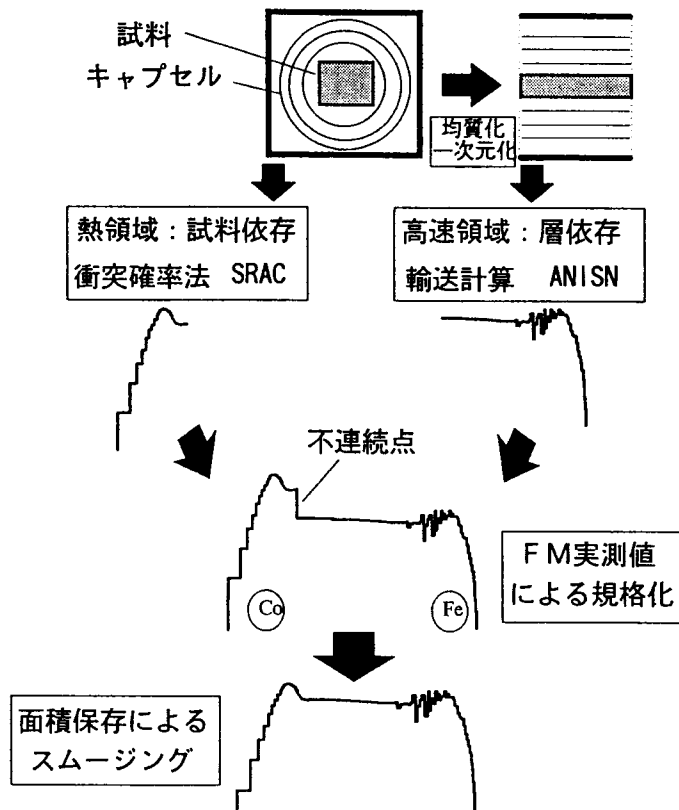


図6 FMスペクトル法の概念

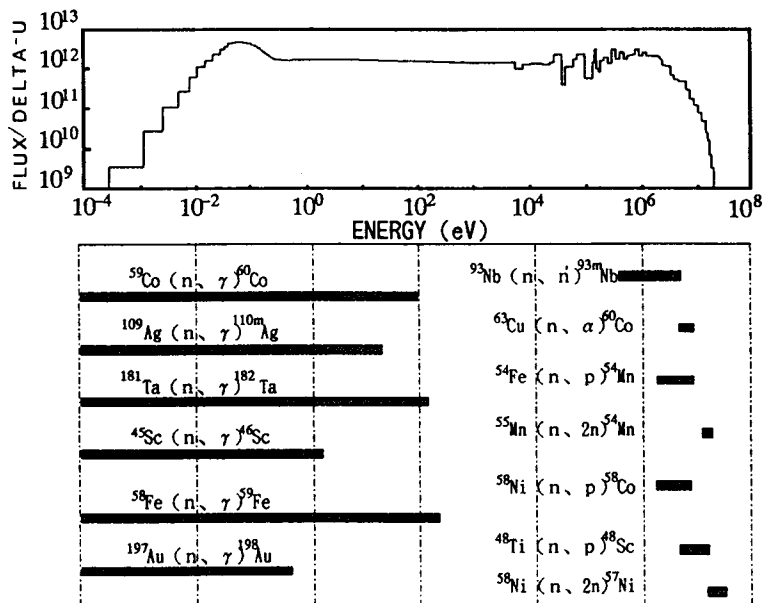


図7 マルチフォイル法に使用する核種の選定

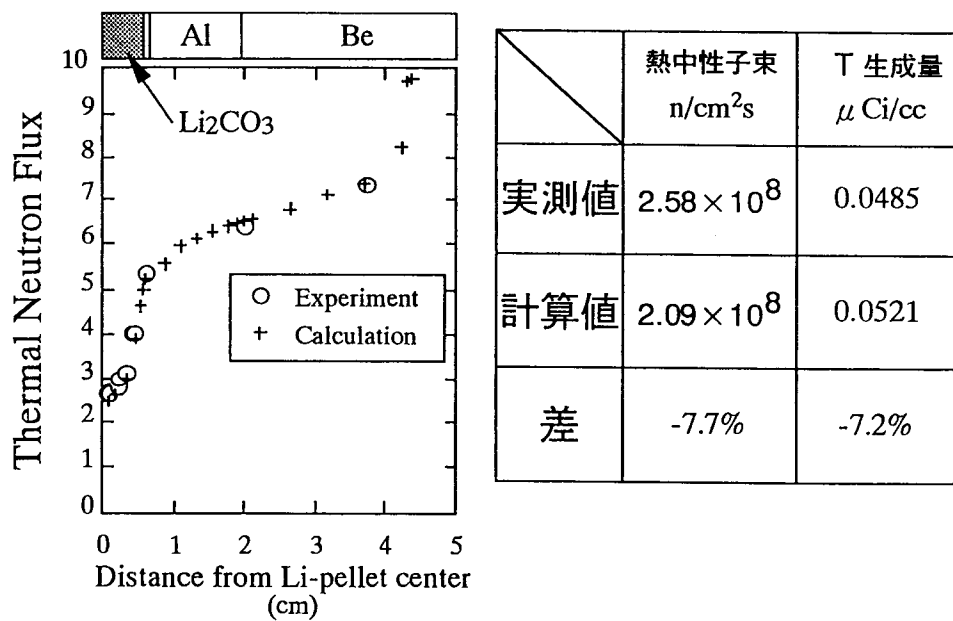


図8 Li_2CO_3 ペレットの熱中性子分布とトリチウム生成量

表1 ベリリウム中のトリチウム生成量

	実験 #1	実験 #2
照射領域 (照射孔)	燃料領域 (H-7-2)	燃料領域 (H-9)
照射時間	22 days	22 days
高速中性子照射量	$2.24 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$	$2.35 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
T 生成量		
実測値 (E)	19 - 20 mCi/cc	22 - 23 mCi/cc
計算値 (C)	19.0 mCi/cc	20.7 mCi/cc
差 (C/E - 1)	0 ~ - 5 %	- 6 ~ - 11 %