

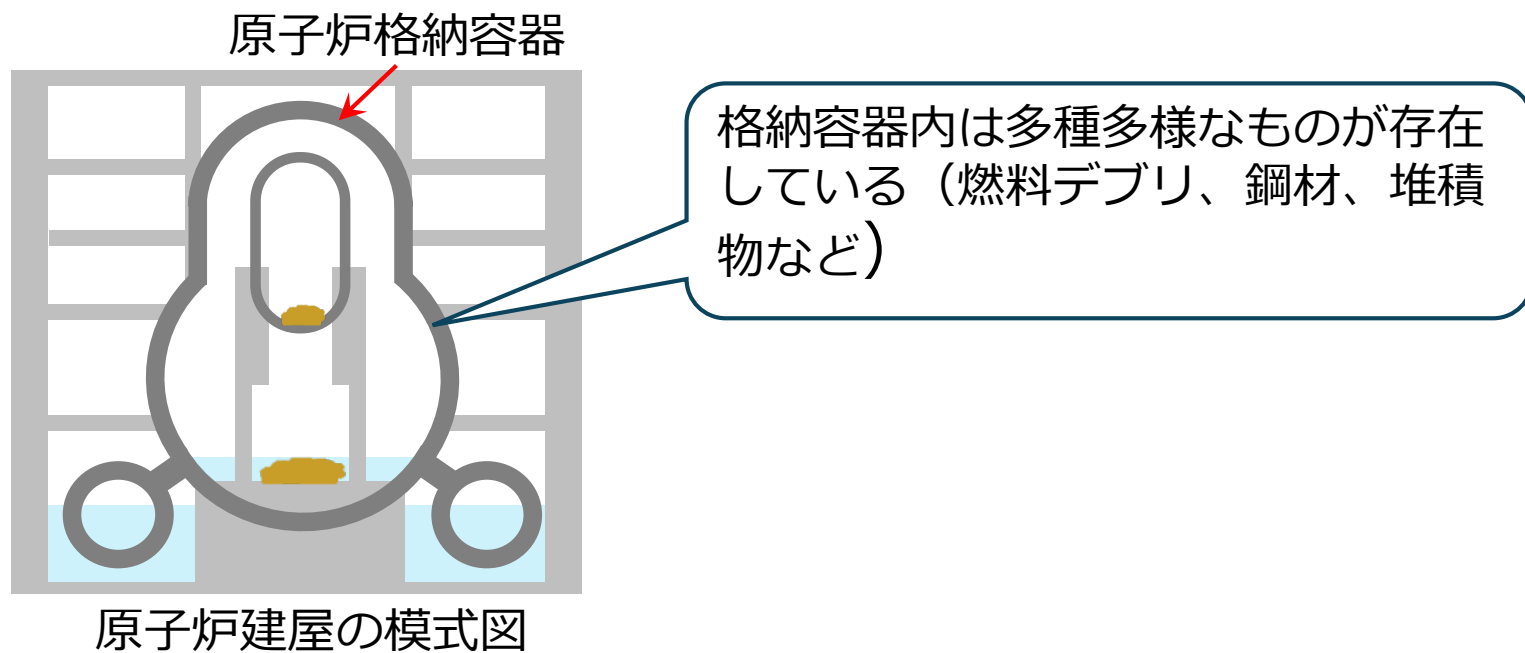
「最も測定が困難な核物質」を 非破壊測定する新技術

令和7年9月24日

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
原子力科学研究所 原子力基礎工学研究センター
原子力センシング研究グループ
グループリーダー 藤 暢輔

- 背景
- 燃料デブリ中の核物質測定における課題
- 高速核分裂中性子同時計数法(FFCC法)
- 従来法とFFCC法との比較
 - ✓ 実験
 - ✓ シミュレーション
- まとめと今後の展望

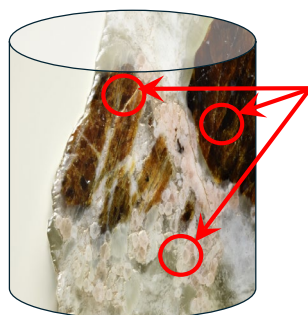
東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の廃止措置では、事故で発生した燃料デブリの取り出しと安全な容器への収納・保管が検討されている



- 燃料デブリ中の核物質については、その含有量を把握することで安全対策の裕度を適切に設定でき、保管時の合理化が期待される
- 燃料デブリの本格取り出し時に適用できる核物質の非破壊測定技術は確立されていない

燃料デブリは、最も分析が困難な核物質

核物質を分析する際の主な影響因子	主な影響
中性子吸収材を含有	中性子を使う分析に 多大な影響
大量のガンマ線を放出	放射線測定に 多大な影響
新しい燃料と古い燃料が混在 核分裂生成物等が抜けている	燃料デブリが放出する放射線から 核物質を求めるのが 困難
非均質、様々な内容物	部分採取で試料全体の核物質量を 求めることが 困難 *1
サイズが大きい（本格取り出し時）	試料内部の測定が 困難



非均質試料

非均質な試料を測定
する場合には、採取
場所によって核物質
の含有量が異なる



核物質の非破壊測定技術である
アクティブ中性子法を検討*2

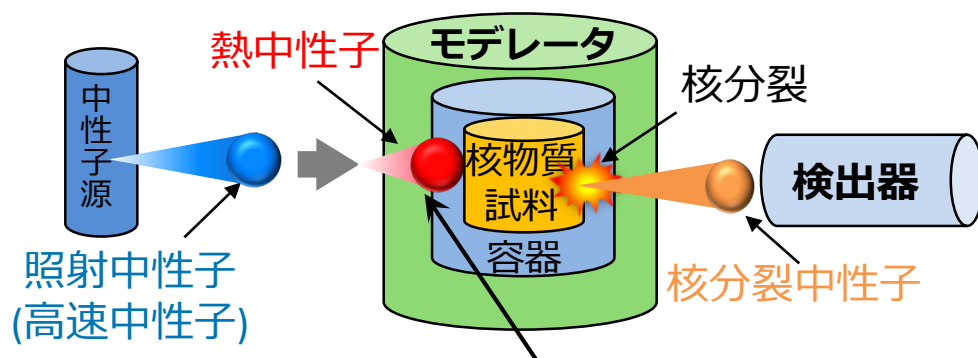
*1:少量の燃料デブリであれば、化学分離を伴う破壊分析等
によって、核物質の含有量等を測定できる

*2:放射線量、かさ密度などの測定に関しては、既存のガンマ線
測定、中性子測定、X線CT測定などの適用が考えられる

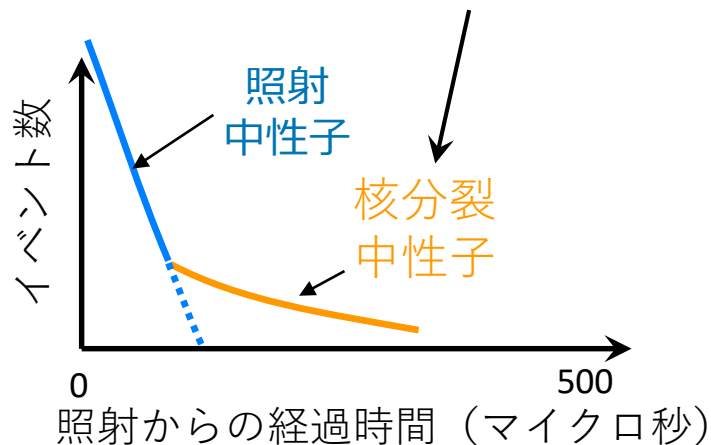
代表的なアクティブ中性子法

アクティブ中性子法：中性子を照射して核分裂反応を引き起こし、核分裂中性子を測定して核物質を定量する手法

ダイアウェイ時間差分析法:Differential Die-Away Analysis (DDA法)



熱中性子になるためには時間がかかるため
核分裂中性子は遅れて出てくる



DDA法で得られるスペクトル

主な特徴

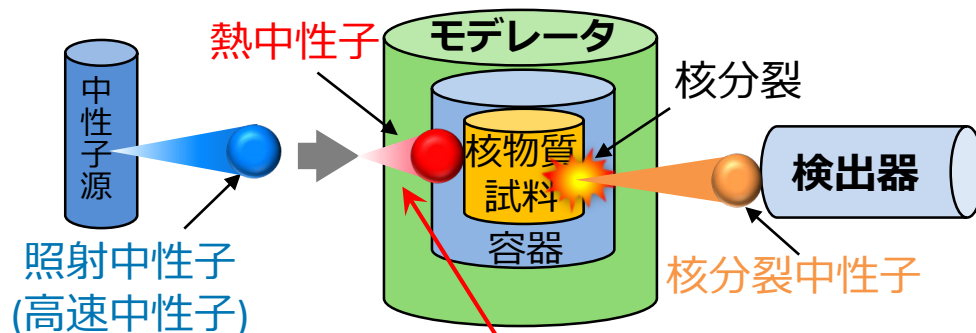
- 核物質を直接測定できる
(熱中性子による核分裂反応を利用して
ウラン-235の量を測定)
- 大きな試料をそのまま非破壊測定
できる (例：ドラム缶など)
- 中性子吸収材の影響を受けやすい



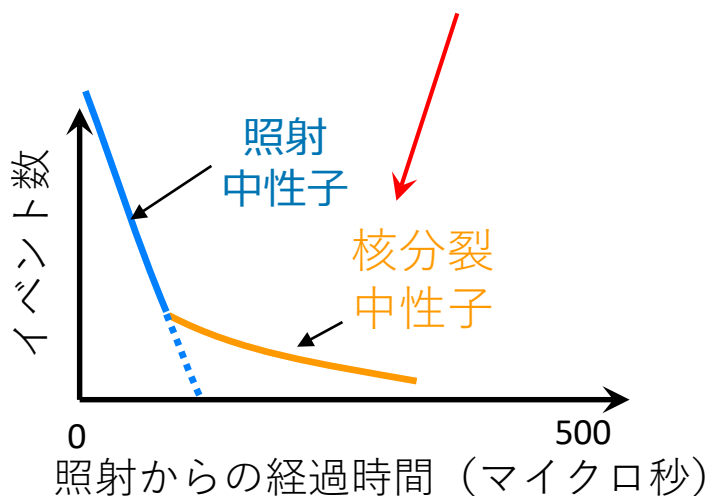
中性子吸収材と反応しにくい
高速中性子による核分裂反応
を利用できないか？
(ウラン-238の量を測定)

ダイアウェイ時間差分析法:Differential Die-Away Analysis (DDA法)

熱中性子を利用 (従来法)

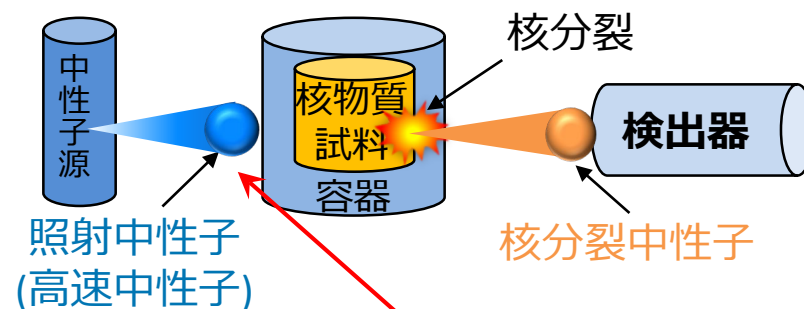


熱中性子になるためには時間がかかるため
核分裂中性子は遅れて出てくる

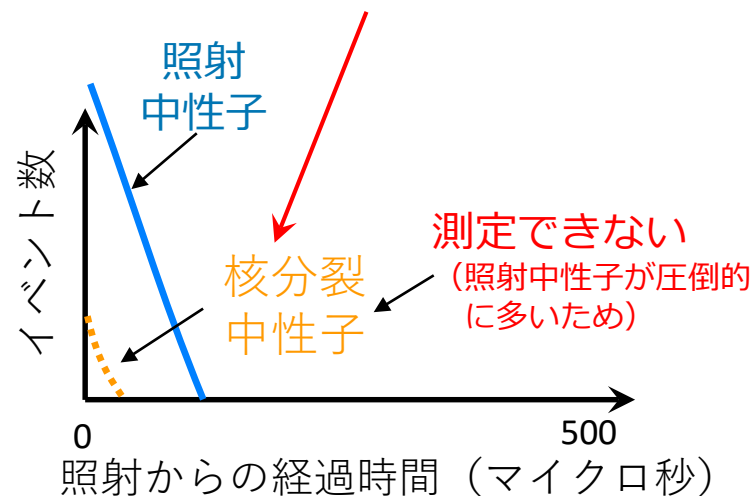


DDA法で得られるスペクトル

高速中性子を利用した場合



高速中性子をそのまま使う場合、
核分裂中性子は遅れない



高速中性子照射によるスペクトル

課題

高速中性子によるAN法実現に必要な
照射中性子と核分裂中性子の識別技術の確立

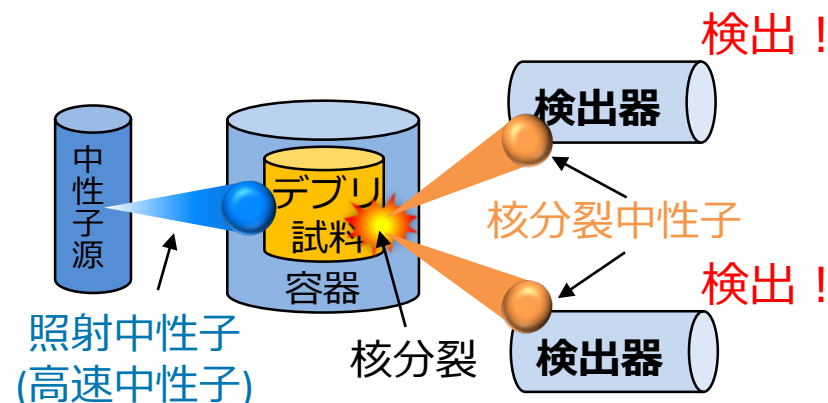
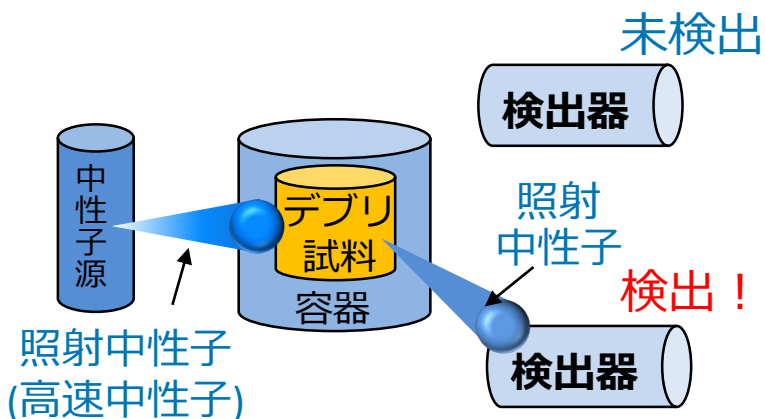


解決策

照射中性子が1個ずつ放出されるのに対し、核分裂中性子は複数個が同時に放出されることを利用する

1 台の検出器が検出 = 照射中性子

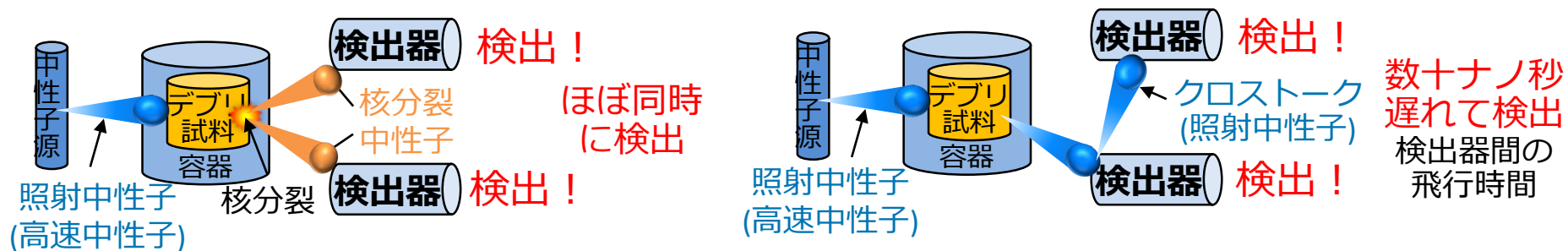
複数台の検出器が検出 = 核分裂中性子



しかし、実際に照射中性子と核分裂中性子を区別するためには
新たな課題が生じる

新たな課題 1

クロストークイベントを判別する必要がある



数十ナノ秒程度での判定が必要
(従来の1000倍程度早い判定)

解決策

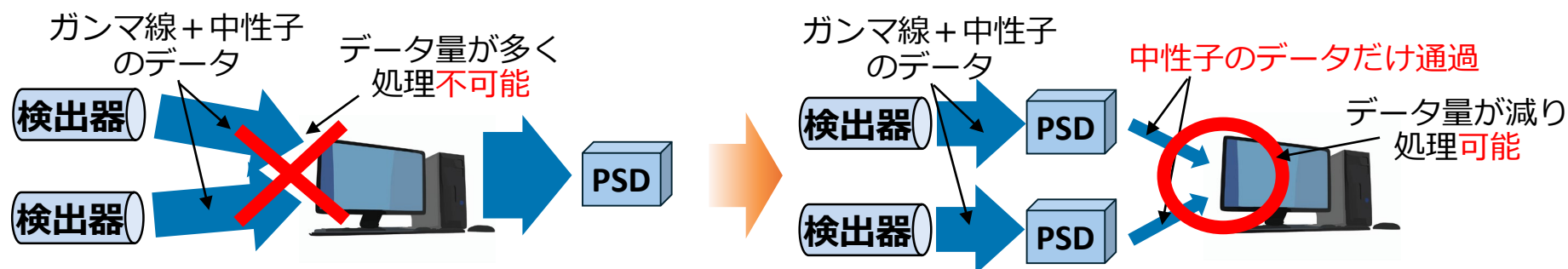
シンチレータ系の検出器を利用

新たな課題 2

シンチレータはガンマ線に感度があるため、その判別と高イベントレートに対処する必要がある

解決策

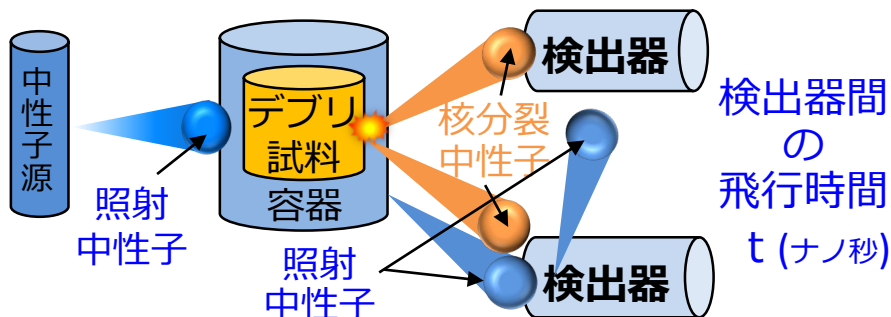
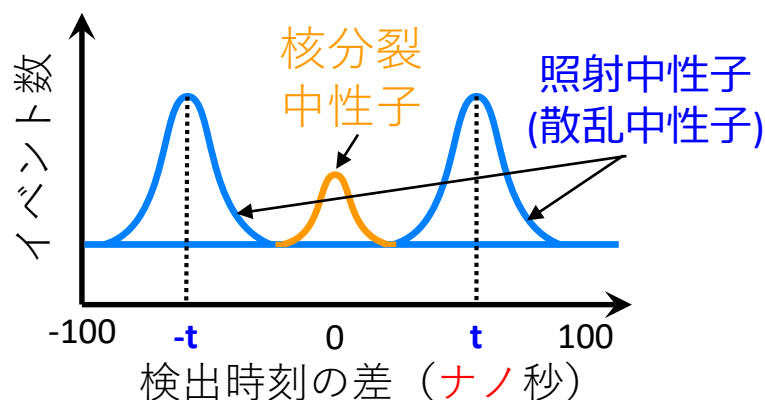
- 波形弁別(PSD)によってガンマ線を取り除く
- 上流で波形弁別(PSD)することでデータ量を抑制する



高速中性子を利用したアクティブ中性子法 高速核分裂中性子同時計数法を開発 (Fast Fission neutron Coincidence Counting: FFCC)

核物質を分析する際の主な影響因子	FFCC法の場合
中性子吸収材を含有	高速中性子により影響が小さい
大量のガンマ線	データ収集系上流での波形弁別によって影響を大幅に低減 (鉛遮蔽も併用)
新しい燃料と古い燃料が混在	核物質を直接測定するので影響が小さい
核分裂生成物等が抜けている可能性	
非均質、様々な内容物	透過力の高い高速中性子を利用することで影響が小さい
サイズが大きい (本格取り出し時)	

FFCC法のスペクトル

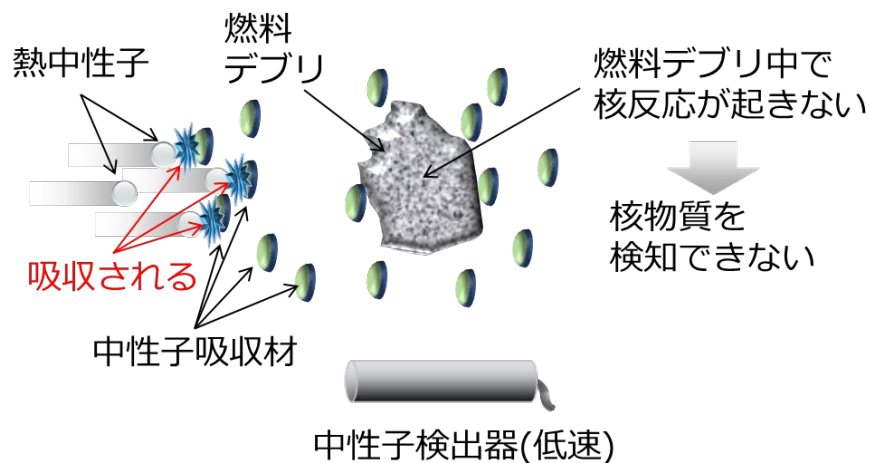


M. Maeda, M. Komeda and Y. Toh (2025) Nucl. Sci. and Eng.
<https://doi.org/10.1080/00295639.2025.2480516>

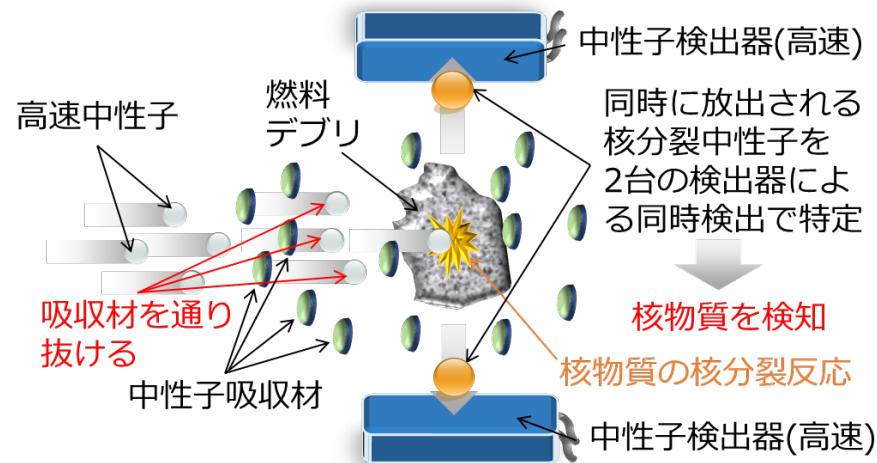
特許第7287736号「物質検知装置」

項目	従来法（DDA法）	新手法（FFCC法）
照射する中性子	熱中性子（低エネルギー） 透過力が低い(高速中性子との比較)	高速中性子（高エネルギー） 透過力が高い
中性子吸収材の影響	大きい(3800barn, B-10(n,α))	小さい(1barn以下, B-10(n,α))
照射中性子と核分裂中性子の区別	核分裂中性子の発生の遅れを利用して区別	2つ以上の検出器の同時計数で区別
検出器	He-3検出器（低速）	液体シンチレータ（高速）
測定対象	吸収材が無い場合に限る （主にウラン-235を測定）	吸収材が混在していても可能 （主にウラン-238を測定）

熱中性子は中性子吸収材を通り抜けられない



高速中性子は中性子吸収材を通り抜ける



- 背景
- 燃料デブリ中の核物質測定における課題
- 高速核分裂中性子同時計数法(FFCC法)
- 従来法とFFCC法との比較
 - ✓ 実験
 - ✓ シミュレーション
- まとめと今後の展望

測定条件

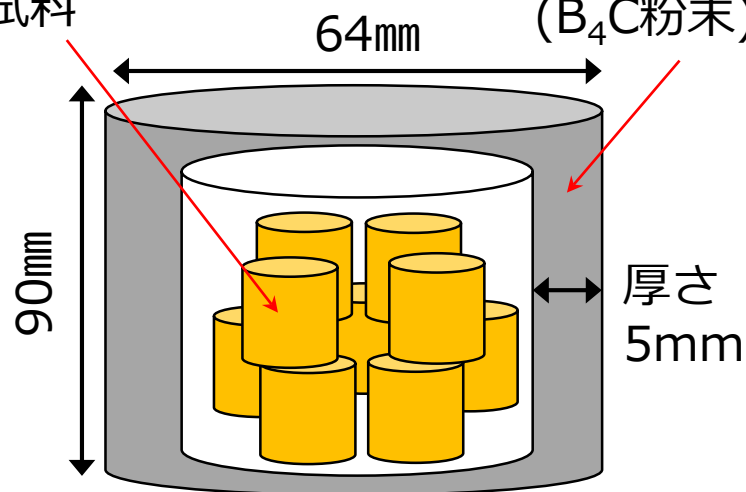
項 目	内 容
試料	・ ウラン 84g (U-235 3.4wt%) ・ 中性子吸収材 (B_4C 125g) No.1 ウラン有、吸収材無 No.2 ウラン無、吸収材無 No.3 ウラン有、吸収材有 No.4 ウラン無、吸収材有
測定時間	20分
測定施設	原子力科学研究所 BECKY

No.3:ウランと中性子吸収材を含む試料



ウラン
試料

中性子吸収材
(B_4C 粉末)



従来法とFFCC法で
同じ試料の測定を実施

従来法（DDA法）

フルスペック装置



項目	内容
サイズ	1.9m×1.9m×H2.1m
検出器	He-3検出器
備考	ドラム缶中の数十mgのウラン-235を測定可能

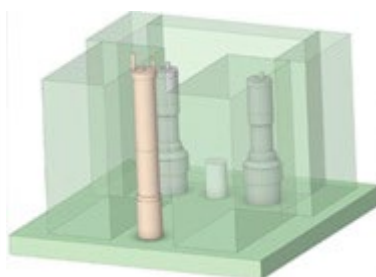
新手法（FFCC法）

簡易的な原理実証体系

原理実証体系

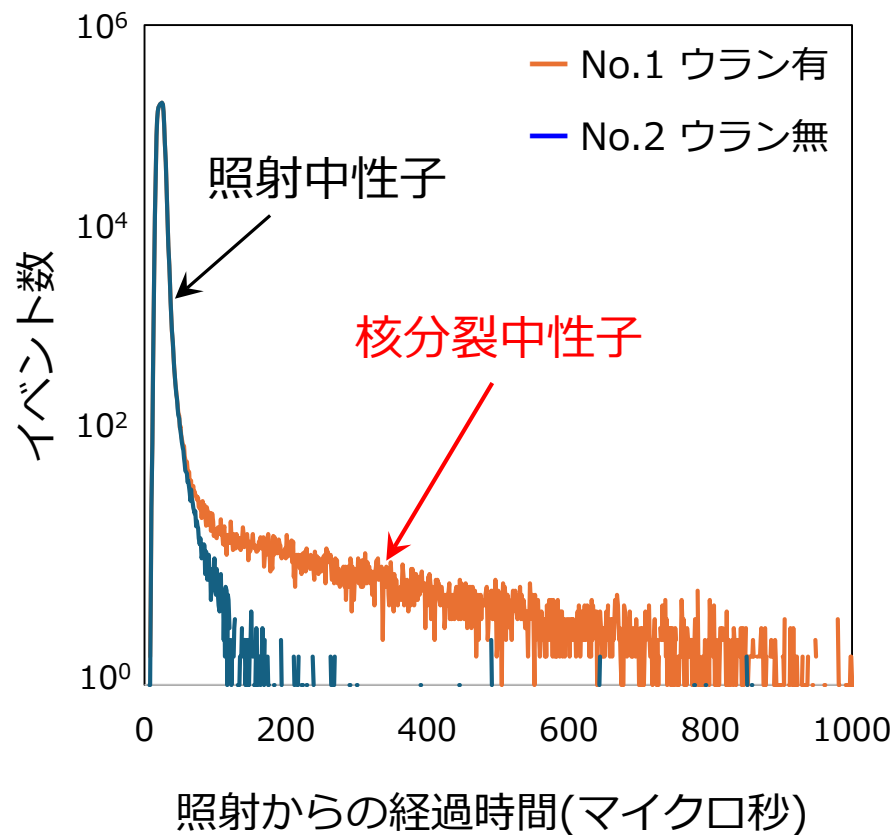


3D体系図

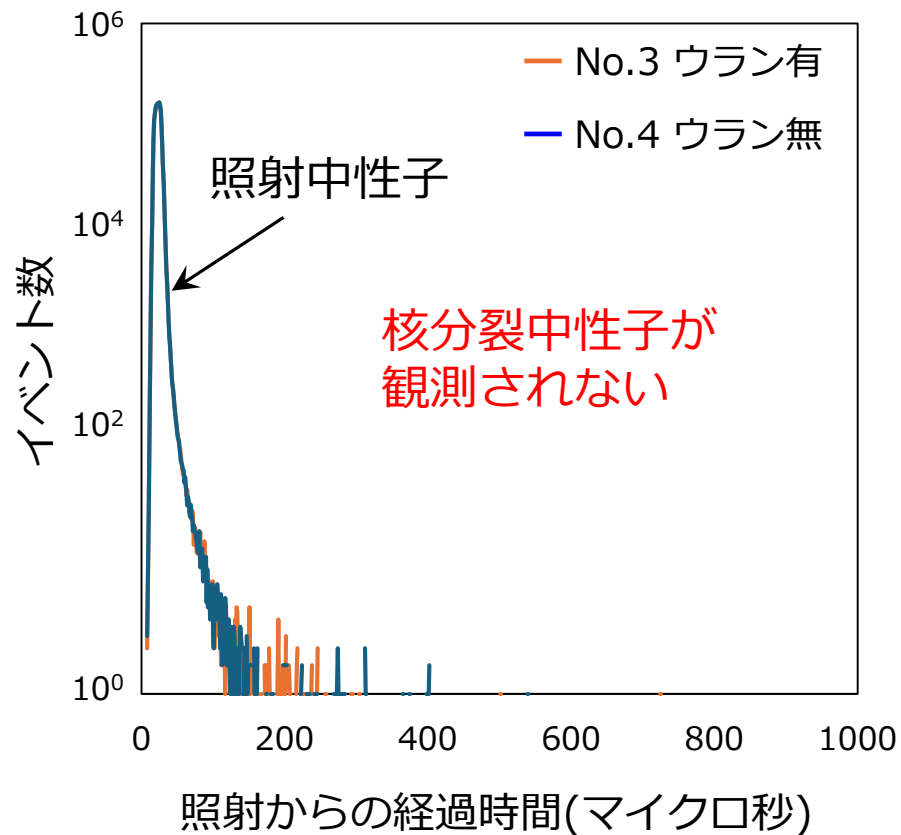


項目	内容
サイズ	0.7m×0.7m×H0.5m
検出器	液体シンチレータ(EJ301)
備考	液体シンチレータを2台並べただけの簡易的な体系

中性子吸収材：無

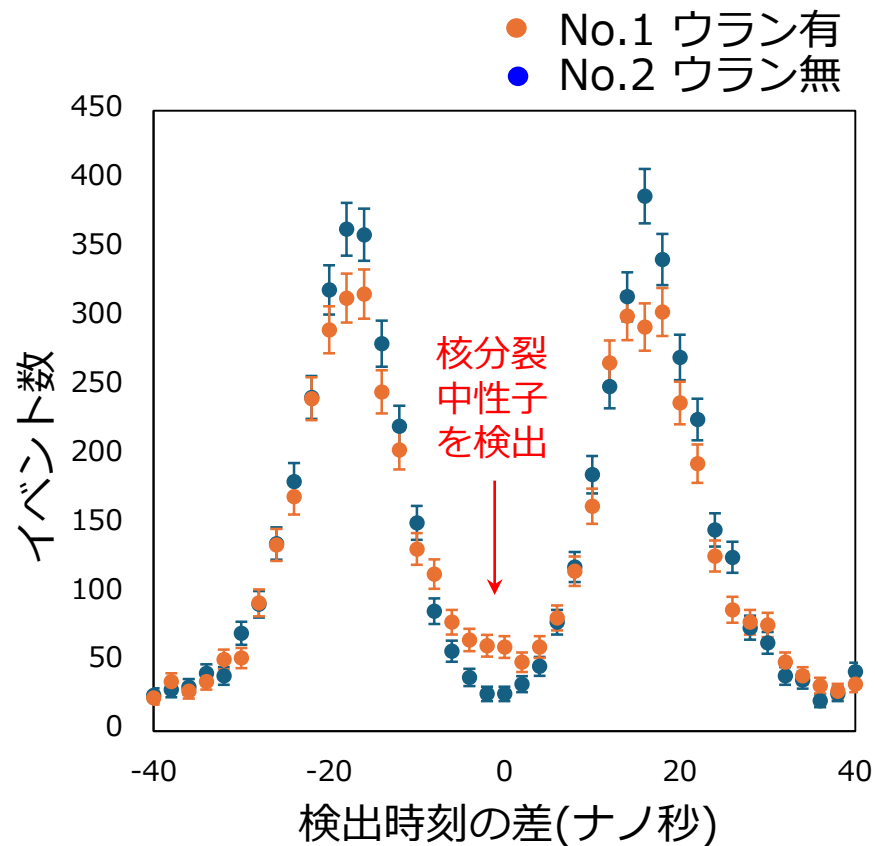


中性子吸収材：有

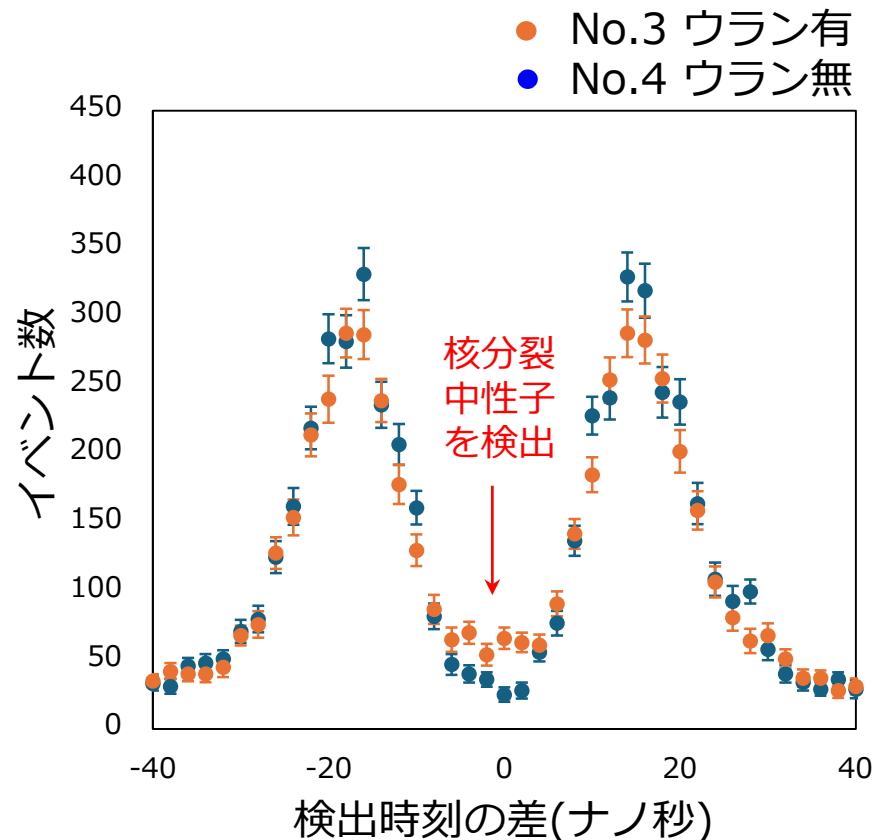


従来法は中性子吸収材が含まれていると核物質の検出が困難

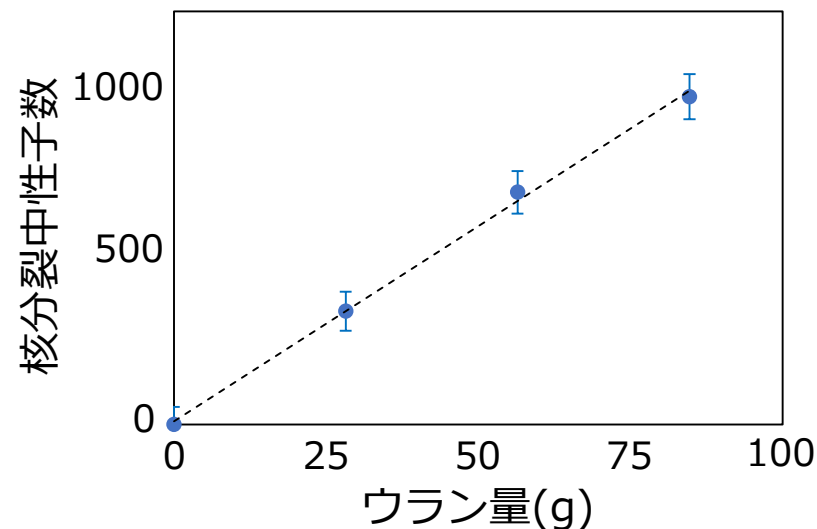
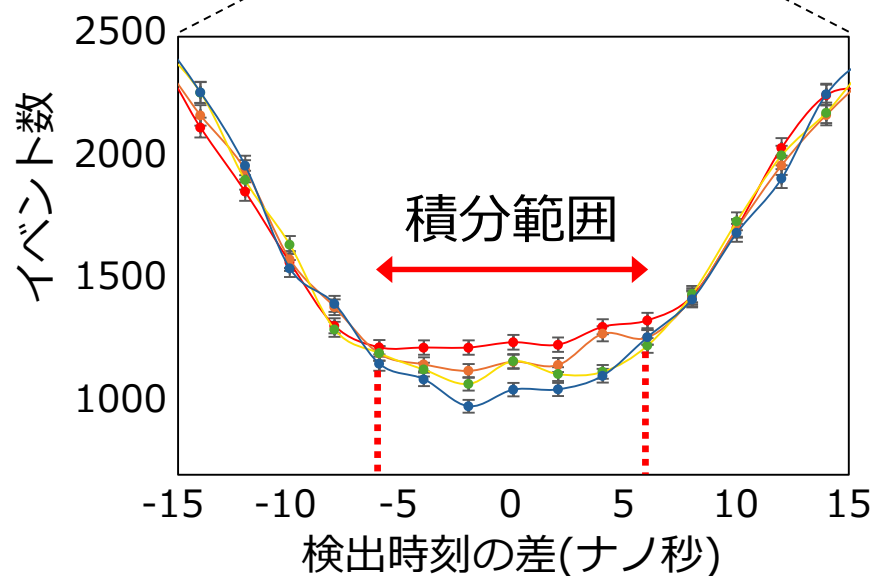
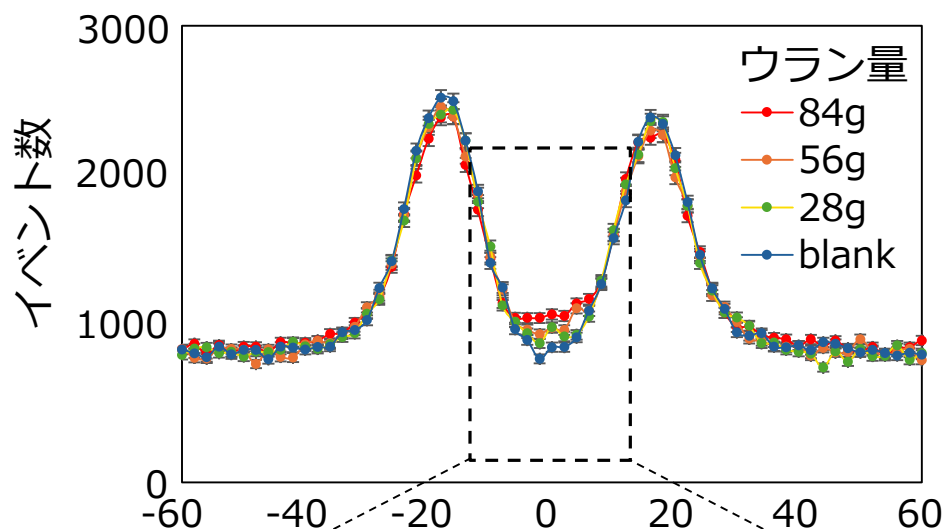
中性子吸収材：無



中性子吸収材：有



簡易体系でも従来法では不可能な中性子吸収材を含むウランを検出



核分裂中性子数と
ウラン量の線形な相関を確認

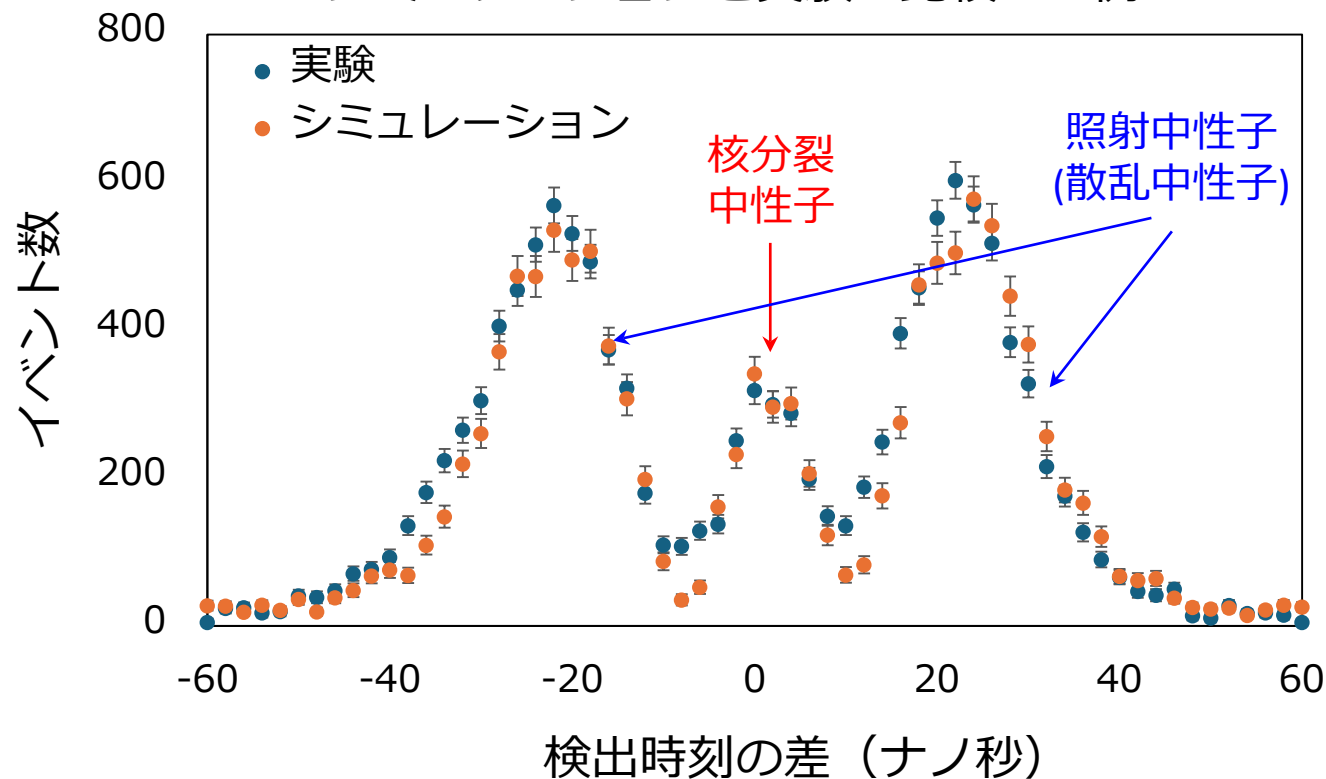


少量でも**定量的な分析が可能**

- 背景
- 燃料デブリ中の核物質測定における課題
- 高速核分裂中性子同時計数法(FFCC法)
- 従来法とFFCC法との比較
 - ✓ 実験
 - ✓ シミュレーション
- まとめと今後の展望

シミュレーションの信頼性を確認するために
シミュレーションと実験で同じ体系を構築して比較

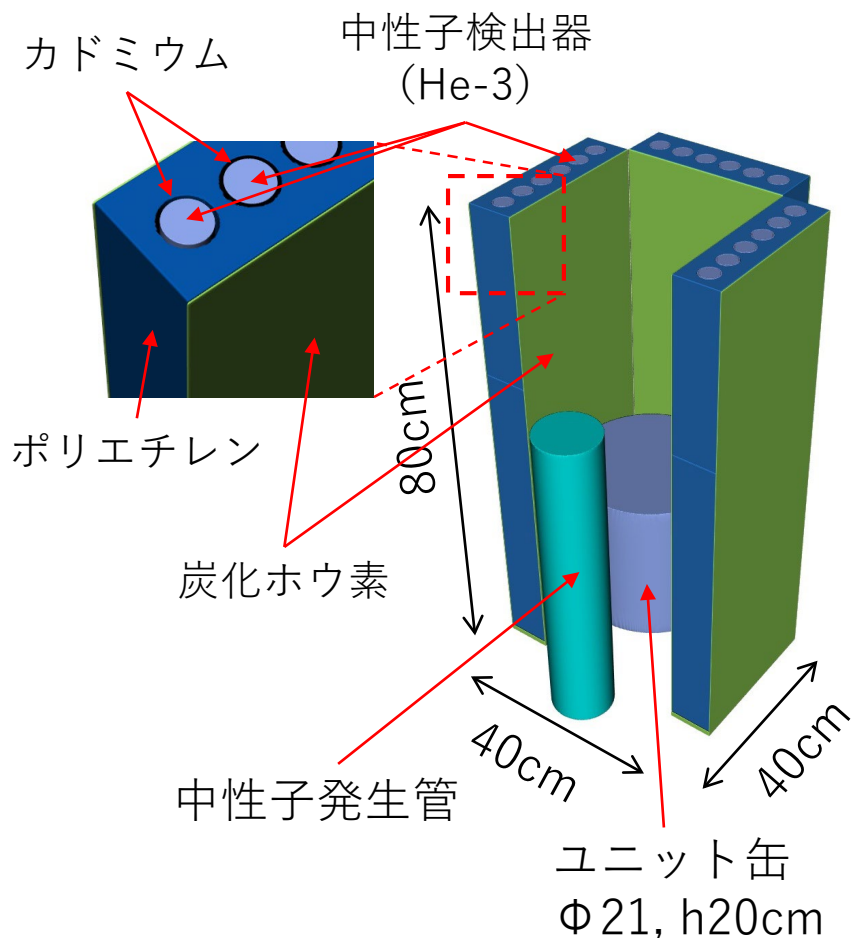
シミュレーションと実験の比較の一例



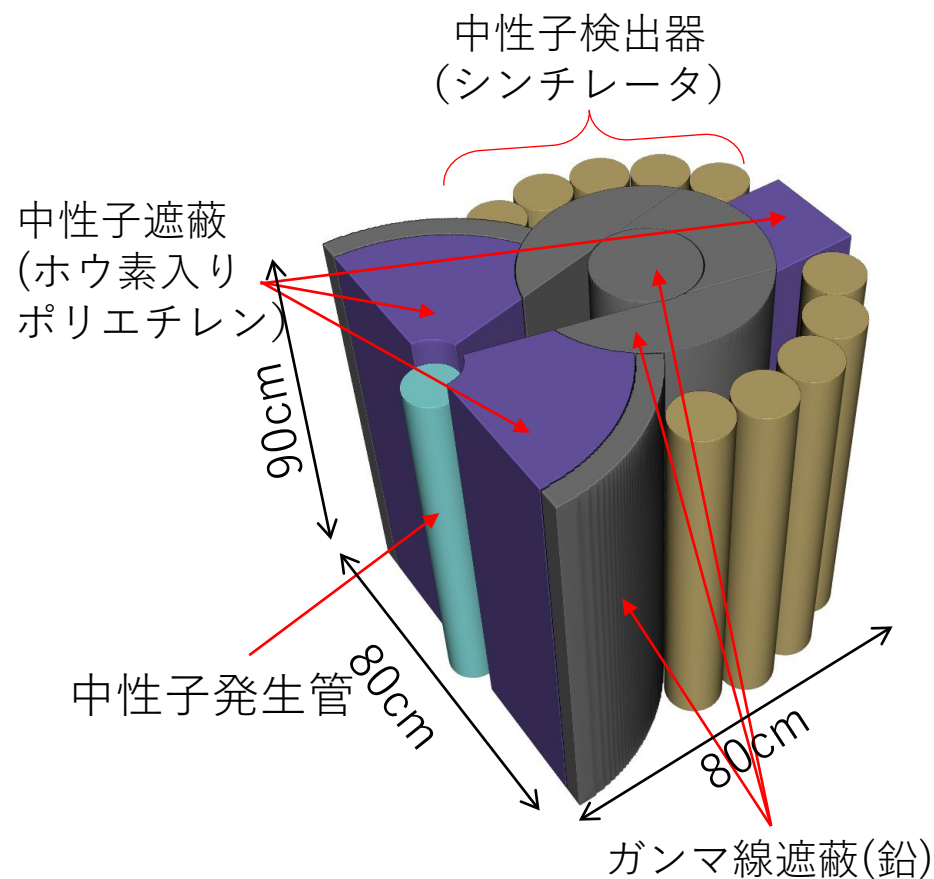
条件	
試料	ウラン 84.7g (濃縮度3.4wt%)
検出器	液体シンチレータ Φ5"×5"×4台

シミュレーションは実験結果を正確に再現
⇒ シミュレーションの信頼性が高いことを確認

従来法(DDA法)の計算体系



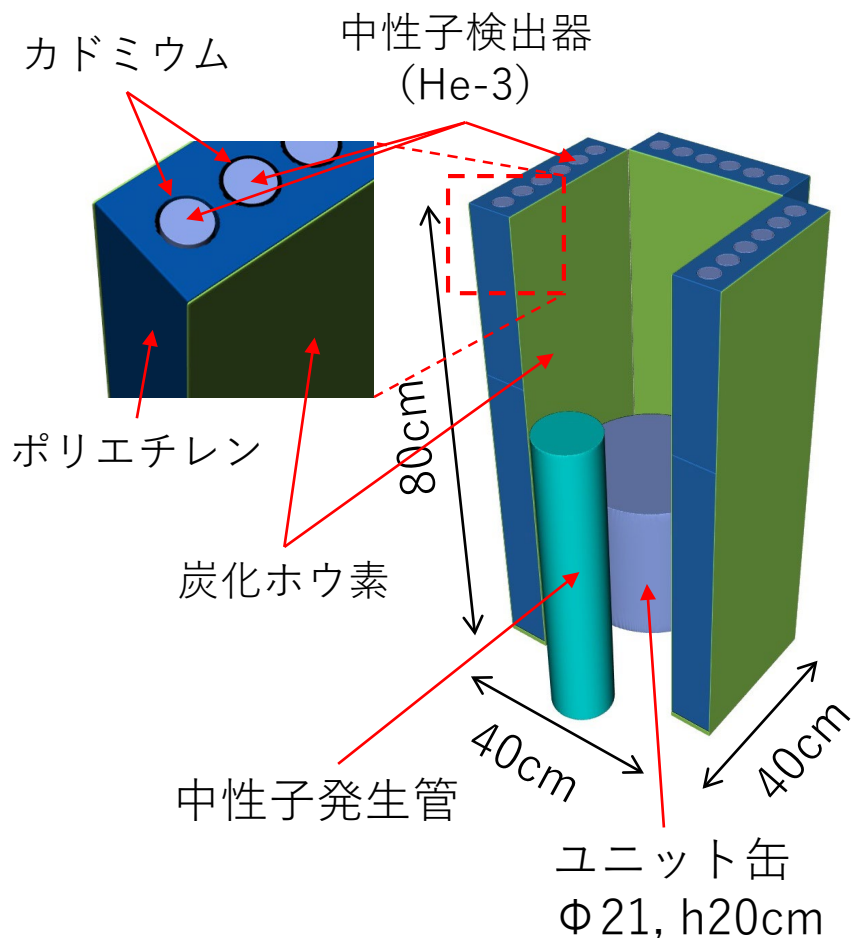
新手法(FFCC法)の計算体系



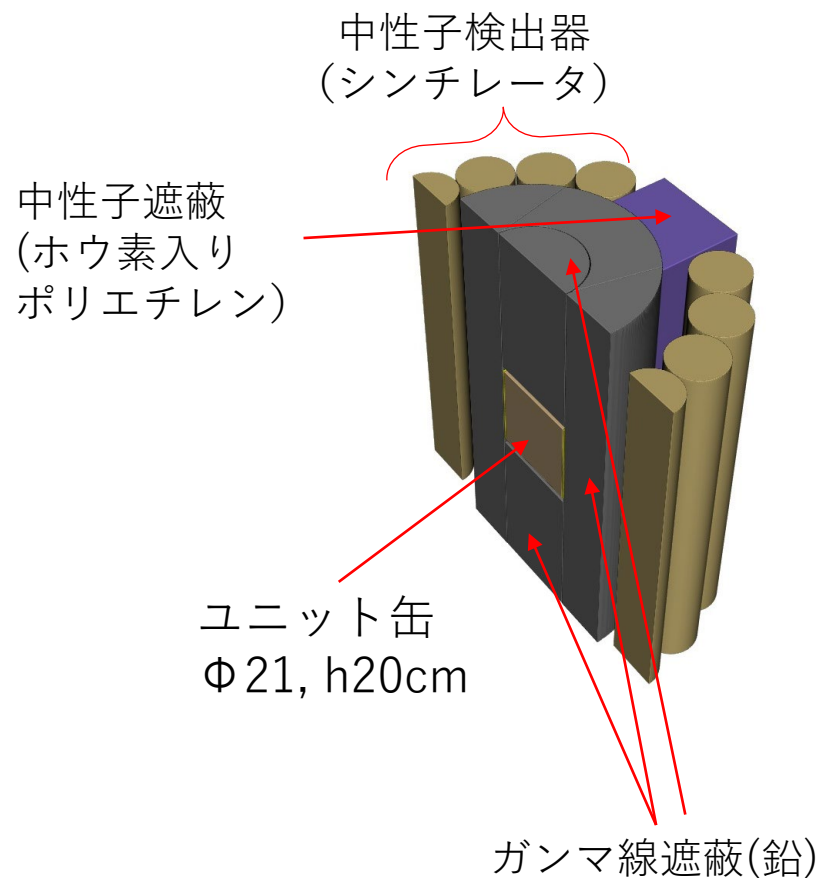
シミュレーションはPHITS,MVPを使用

基本性能を確認するための計算であるため、最適化された体系ではない

従来法(DDA法)の計算体系



新手法(FFCC法)の計算体系(断面図)



シミュレーションはPHITS,MVPを使用
基本性能を確認するための計算であるため、最適化された体系ではない

想定試料A

ケース No.	中性子源	ケース概要	感度解析パラメータ			
			組成	含水率	燃焼度	中性子吸収材
A-1	D-D反応 (2.45MeV)	ベースケース	UO ₂ : 15.0vol% ZrO ₂ : 15.0vol% (UO ₂ :約9kg)	1wt%	23GWd/t	なし
A-2		低燃焼度			1.3	
A-3		高燃焼度			51	
A-4		ウランリッチ	23			
A-5		ウランリッチ 低燃焼度	1.3			
A-6		ウランリッチ 高燃焼度	51			
A-7-1		ベースケース 中性子吸収材1	UO ₂ : 15.0vol% ZrO ₂ : 15.0vol%	1wt%	23	Gd ₂ O ₃ 3vol%
A-7-2		ベースケース 中性子吸収材2				Gd ₂ O ₃ 30vol%
A-7-3		ベースケース 中性子吸収材3				B ₄ C 0.51vol%
A-7-4		ベースケース 中性子吸収材4				B ₄ C 10vol%
A-8		低燃焼度 中性子吸収材	1.5		Gd ₂ O ₃ 3vol%	
A-9		高燃焼度 中性子吸収材	51			
A-10		A-4 + 中性子吸収材	23			
A-11		A-5 + 中性子吸収材	1.3			
A-12		A-6 + 中性子吸収材	51			
A-13	ベースケース 含水率低	UO ₂ : 6.3vol% ZrO ₂ : 6.3vol%	0.1wt% 70vol%	23	なし	
A-14	ベースケース 含水率高					

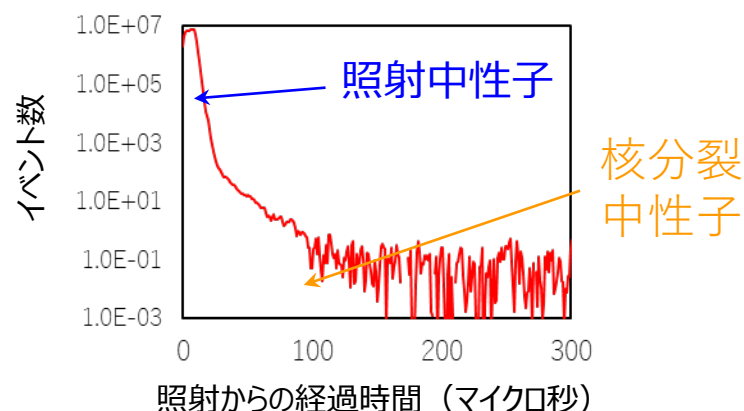
想定試料B

ケース No.	中性子源	ケース概要	感度解析パラメータ			
			組成	含水率	燃焼度	中性子吸収材
B-1	D-D反応 (2.45MeV)	ベースケース	UO ₂ : 1.05vol%	1wt%	23GWd/t	なし
B-2		低燃焼度	ZrO ₂ : 1.05vol%		1.3	
B-3		高燃焼度	SUS: 7.2vol%		51	
B-4		Conc組成感度	Conc: 20.7vol%		23	
B-5		Conc組成感度 低燃焼度	UO ₂ : 1.05vol%		1.3	
B-6		Conc組成感度 高燃焼度	ZrO ₂ : 1.05vol%		51	
B-7-1		ベースケース 中性子吸収材1	SUS: 7.2vol%		23	Gd ₂ O ₃ 3vol%
B-7-2		ベースケース 中性子吸収材2	Conc: 50.7vol%			Gd ₂ O ₃ 30vol%
B-7-3		ベースケース 中性子吸収材3	UO ₂ : 1.05vol%			B ₄ C 0.51vol%
B-7-4		ベースケース 中性子吸収材4	ZrO ₂ : 1.05vol%			B ₄ C 10vol%
B-8		低燃焼度 中性子吸収材	SUS: 7.2vol%		1.5	Gd ₂ O ₃ 3vol%
B-9		高燃焼度 中性子吸収材	Conc: 20.7vol%		51	
B-10		B-4 + 中性子吸収材	UO ₂ : 1.05vol%		23	
B-11		B-5 + 中性子吸収材	ZrO ₂ : 1.05vol%		1.3	
B-12		B-6 + 中性子吸収材	SUS: 7.2vol%		51	
			Conc: 50.7vol%			

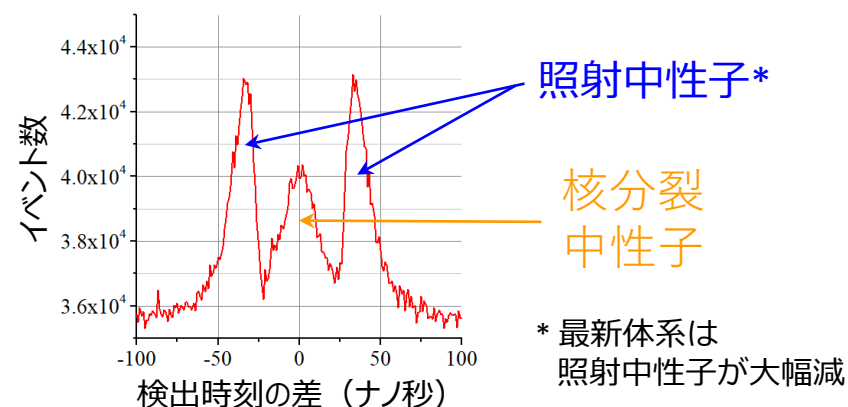
想定試料C

ケース No.	中性子源	ケース概要	感度解析パラメータ			
			組成	含水率	燃焼度	中性子吸収材
C-1	D-D反応 (2.45MeV)	ベースケース	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 29.85vol%	1wt%	23GWd/t	なし
C-2		組成感度 (SUS)	UO ₂ : 0.075vol% ZrO ₂ : 0.075vol% SUS: 44.85vol%			
C-3		組成感度 (UO ₂ , ZrO ₂)	UO ₂ : 0.48vol% ZrO ₂ : 0.0vol% SUS: 10.0vol%			

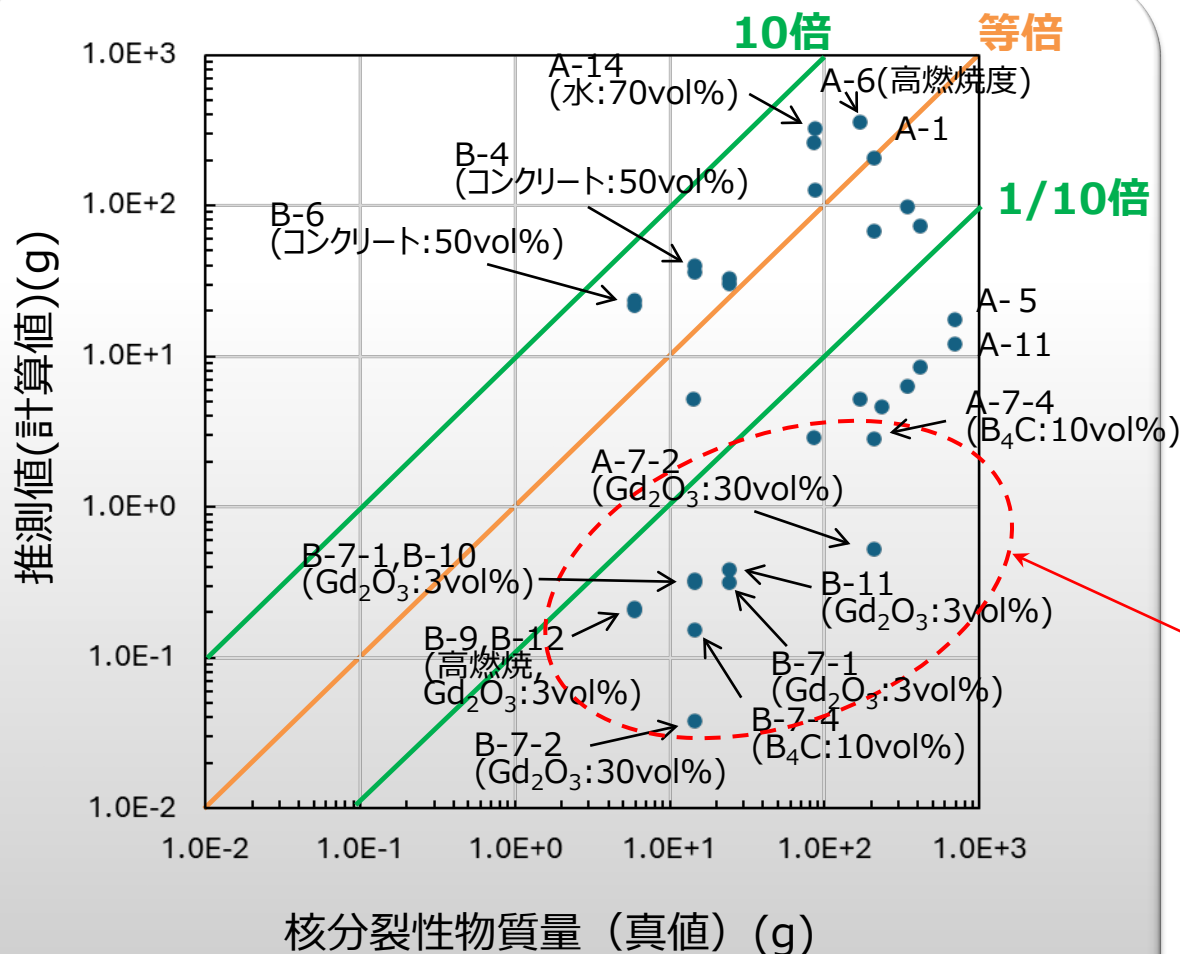
シミュレーションで得られた
従来法のスペクトル例 (A-1)



シミュレーションで得られた
FFCC法のスペクトル例 (A-1)



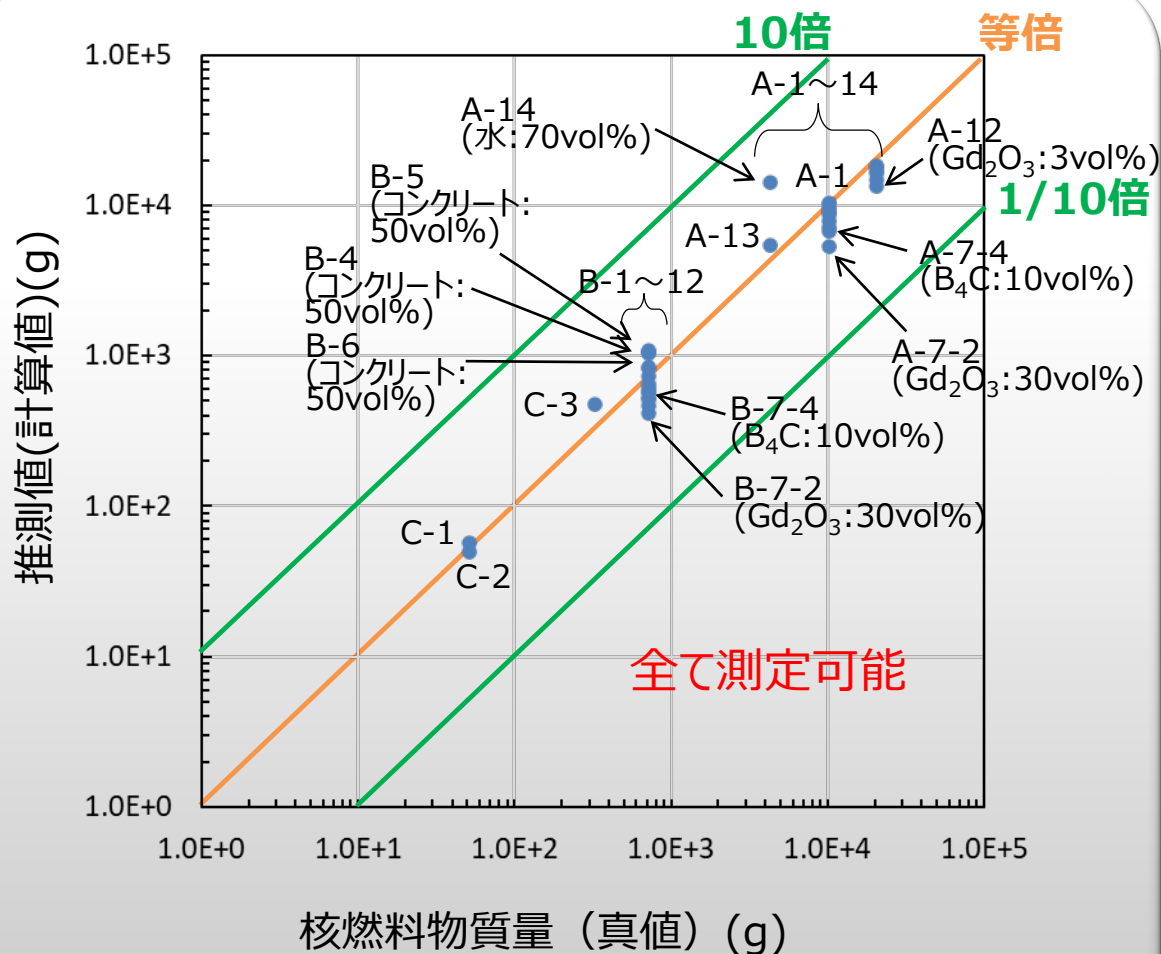
解析結果 中性子吸収材,含水率等の影響確認



解析条件

- ・測定時間：10分間
 - ・中性子束： 10^7 n/s
 - ・A-1を基準(推測値 = 真値)
- 注) 統計誤差(3σ)は、点より小さい。

解析結果 中性子吸収材,含水率等の影響確認



解析条件

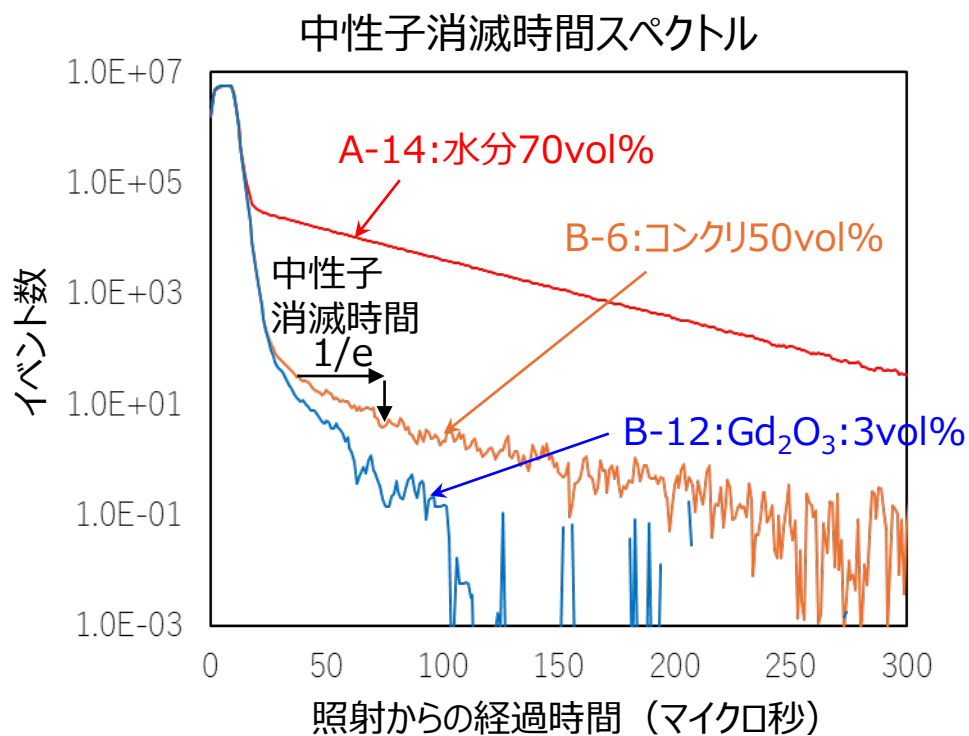
- ・測定時間：10分間
 - ・中性子束： 10^7 n/s
 - ・A-1を基準(推測値 = 真値)
- 注) 統計誤差(3σ)は、点より小さい。



補正によるさらなる
高精度化を検討

試料による中性子消滅時間の違い

中性子消滅時間はFFCC法装置で取得可能

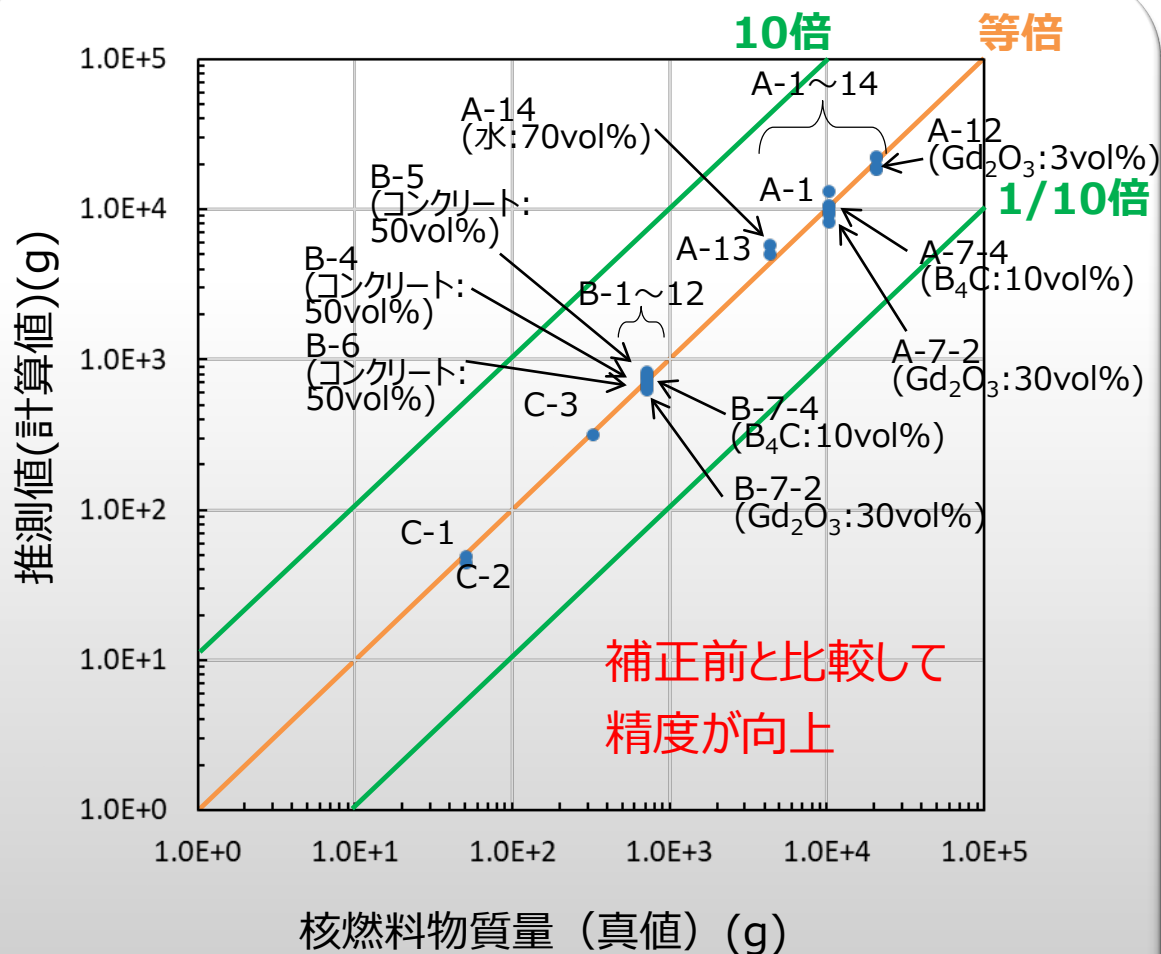


中性子消滅時間

ケース	水	消滅時間 (μs)	ケース	コンクリート	消滅時間 (μs)
A-1	1wt%	12.9	B-1	20vol%	14.4
A-2		9.8	B-2		14.4
A-3		17.7	B-3		13.6
A-4		12.5	B-4		21.8
A-5		10.1	B-5		20.7
A-6		16.9	B-6		20.4
A-7-1		11.5	B-7-1	中性子吸収材	11.8
A-7-2		11.2	B-7-2		8.2
A-7-3		13.2	B-7-3		12.4
A-7-4		14.1	B-7-4		13.7
A-8		12.1	B-8	中性子吸収材	9.9
A-9		12.1	B-9		12.2
A-10		12.4	B-10		9.6
A-11		12.1	B-11		11.7
A-12		13.2	B-12		12.4
A-13	0.1wt%	9.9			
A-14	70Vol%	41.1			

中性子消滅時間が、FFCC法に影響を与える水分やコンクリートの量に依存するため、
FFCC法の補正に利用できる可能性がある

中性子消滅時間等による簡易補正結果



解析条件

- ・測定時間：10分間
 - ・中性子束： $10^7 n/s$
 - ・A-1を基準(推測値 = 真値)
 - ・補正適用済
- 注) 統計誤差(3σ)は、点より小さい。

中性子消滅時間、全高速中性子数、検量線による簡易補正を適用

まとめ

- 高速中性子と同時計数を利用した新手法 FFCC法を開発した
- FFCC法は、従来法では測定が困難であった中性子吸収材を含む試料にも適用可能であることを実証した
- 燃料デブリを対象としたシミュレーションにより、FFCC法が従来法に比べて大幅に高精度な測定を実現できることを明らかにした

今後の展望

- 東京電力ホールディングス（株）福島第一原子力発電所の燃料デブリ本格取り出し時の核物質測定
- 中性子吸収材による隠匿核物質の検知など核セキュリティ分野での応用

本資料に含まれる技術は、以下の事業において、燃料デブリへの適用に向けた技術開発に活用されるとともに、今後の活用も予定されています。また、本資料には、それらの成果の一部が含まれています。

- 令和4年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発））」に係る補助事業
- 令和5年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金」燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（仕分けに必要な燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）に係る東双みらいテクノロジー株式会社からの受託事業
- 令和7年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金」燃料デブリの性状把握のための分析・推定技術の開発（燃料デブリ等の非破壊計測技術の開発）