

平成21年 5月 5日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18360449  
 研究課題名（和文） GeV オーダー加速器を用いるハイブリッドシステムの中性子監視法の開発  
 研究課題名（英文） Development of Neutron Monitoring Method for Hybrid System Using GeV-order accelerator  
 研究代表者  
 岩崎 智彦（IWASAKI TOMOHIKO）  
 東北大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：70184869

研究成果の概要： GeV オーダー加速器を用いるハイブリッドシステムの中性子スペクトルを測定監視するための新たな測定手法の開発に関する研究を実施した。大型加速器の実験により高エネルギー中性子スペクトル測定の導出方法について成果を得た。また、原子炉臨界集合体の実験により、高速中性子（低エネルギー）中性子スペクトル測定手法について成果を得た。これらの測定法を用いて全エネルギー領域における中性子エネルギー測定法について検討し、加速器駆動未臨界炉（ADS）などに用いることのできる加速器ブリッドシステム内の中性子監視法について新たな知見成果を得た。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	8,500,000	2,550,000	11,050,000
2007年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	11,000,000	3,300,000	14,300,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力学

キーワード：中性子スペクトル測定、未臨界原子炉、加速駆動原子炉、ビスマス、ニオブ、放射化、アンフォールディング

## 1. 研究開始当初の背景

GeV オーダー加速器と未臨界原子炉を組み合わせたハイブリッドシステムとしての一つとして、現在加速駆動未臨界原子炉（ADS：付録図1参照）が研究・開発中である。

このシステムは、未臨界運転による高い安全性、優れた核変換処理性能を持つ先進原子炉原子力システムである。ADSは、臨界炉では不可能な領域での原子力利用を可能とする新たなシステムとして期待され、さらに、

高エネルギー陽子駆動による多数の中性子発生と、未臨界原子炉による中性子増倍の現象の利用により、加速器運転のための電力を自給でき（余電力を外部供給でき）、エネルギー収支にも優れたシステムである。このADSをはじめとするGeV オーダー加速器によるハイブリッドシステムは、未知の研究課題を数多く含み、将来を担う夢あふれるものである。

現在、このGeV オーダー加速器によるハイブリッドシステムやADSは、研究開発の第1段階（概念確立）に留まり、数多くの研

究課題が存在する。このため、現在は、ADSを対象にした研究開発が進められており、実験施設の建設が世界中で予定されている（米国、欧州、日本のJ-PARC計画と京大炉ADS研究計画）。それらの施設では、加速器、原子炉両面の課題について、数多く研究・開発される予定であるが、すべての課題の共通基盤的な問題として、高エネルギー中性子駆動の原子炉特性の問題が存在する。

高エネルギー中性子により駆動されるシステム（GeV オーダー加速器＋未臨界原子炉）の特性を的確に把握するためには、まず高エネルギー中性子の原子炉内での挙動の高精度把握が必須であるが、高エネルギー領域における未解明な物理現象と、それに伴う解析精度の限界のため、現在十分な把握ができていない。このため、高エネルギー中性子挙動に対しては、実験・測定による研究が、現在第一に必要な課題となっている。しかしながら現在のところ、原子炉実験や利用の難しさ（および面倒さ）などから、原子炉に対する研究はほとんど行われておらず、原子炉内における高エネルギー中性子測定方法すら、存在しない現状にある。

## 2. 研究の目的

本研究では、このような現状に鑑み、本研究では、ADSやGeVオーダー加速器によるハイブリッドシステム内における中性子エネルギースペクトル測定法を新たに開発するとともに、その測定法を用い、GeVオーダー加速器によるハイブリッドシステム内の中性子監視法の開発を行う。

これまでの研究では、20MeV以上の高エネルギー中性子に関しては、その測定法が示されず、当然ながらその実証がなされていない。また、20MeV以下の高速中性子測定法に関しては、放射化箔による測定実験が過去に一部行われているが、その研究は極めて限定的であり、特にADSなどの原子炉環境での測定を念頭に置いた研究あるいは実証はほとんど行われていない。これらを踏まえ、本研究では、以下2つ実験を行ない、ADS炉内のエネルギー中性子末スペクトル測定法の確立を目指す。

### (1) 高エネルギー中性子の中性子エネルギースペクトル測定実験

本研究では、高エネルギー中性子の測定のため、連続した断面積（付録図2参照）を持つビスマス（Bi）に初めて着目し、その放射化箔を用いることを考案した。

高エネルギー中性子スペクトル測定実験では20MeV以上の中性子エネルギースペクトルを対象としたBi放射化実験により、その妥当性を検討し、実験で得られた反応率より中性子スペクトル導出の可能性について検討した。

### (2) 高速中性子（低エネルギー中性子）の中性子エネルギースペクトル測定実験

高速中性子エネルギースペクトル測定実験では、KUCA-A 架台及び付設加速器を用いた放射化実験を行い、1MeVから14MeVまでの高速及び高エネルギースペクトル測定のための箔の選定を行ない、それらについて原子炉実験を実施し、最適な箔の選定および実験条件の抽出を図った。

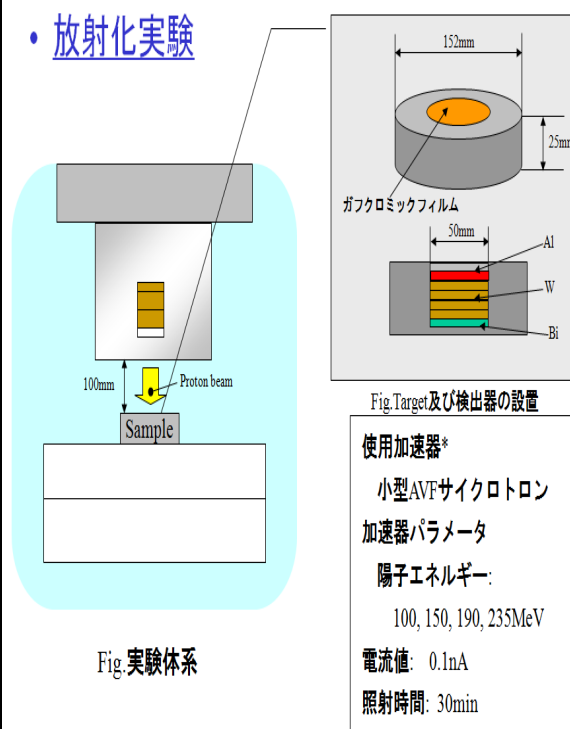
## 3. 研究の方法

以上の目的に沿い、以下の二つの実験を実施した。

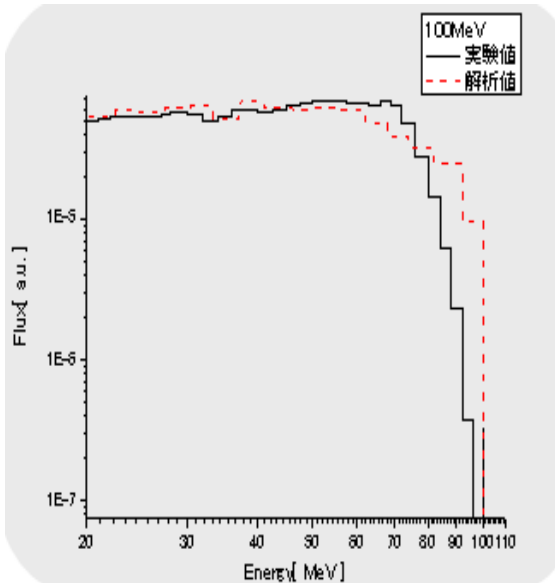
### (1) 高エネルギー中性子の中性子エネルギースペクトル測定実験

実験は国立がんセンター東病院にて計4回（'07/5/28～6/1、'07/6/25～29、'07/9/10～9/14、'07/11/5～11/9）の実験を行い、Bi放射化検出器及びタングステン（W）ターゲットにサイクロトロンを用いて加速した陽子を照射した。実験概要図を下に示す。

### ・放射化実験



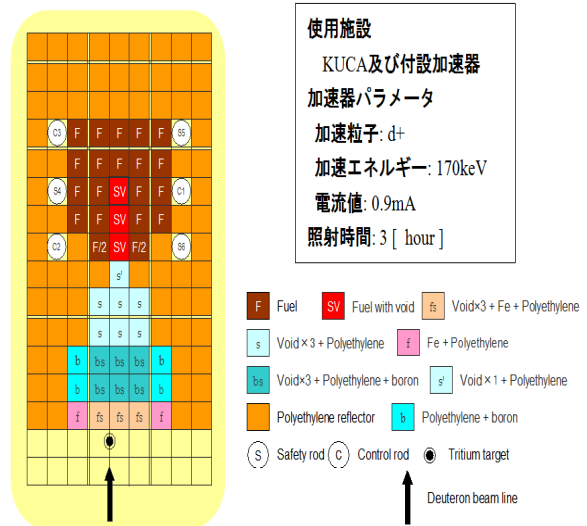
実験後 核破砕反応により発生した中性子により放射化された Bi の反応率を測定し、そこから中性子スペクトルを算出した。その果の一部を以下の図に示す。



この実験により  $\text{Bi}(n, 12n)$  反応まで安定して測定できることが示されるとともに、一部と統計量が少ない反応を除いてアンフォールディングを行なうことにより妥当な中性子スペクトルが得られた。以上の結果から、Bi による高エネルギースペクトル測定が可能であることが確認された。

#### (2) 高速中性子（低エネルギー中性子）の中性子エネルギースペクトル測定実験

京都大学臨界集合体実験装置（Kyoto University Critical Assembly : KUCA）及び付設の Cockroft-Walton 加速器を用いて、未臨界体系における反応率測定を行なった。実験には、In、Fe、Al、Nb の 4 核種を用い 14MeV の高速及び高エネルギー中性子場での反応率測定実験を行なった。その際、ターゲット前と炉中心で発生する中性子量と放射化量を比較するため、それら放射化検出器をターゲット前と炉内中心の 2 箇所に設置して実験を行なった。実験は計 4 回の照射実験を行っているが、その一例として、2007 年 10 月 16 日から 10 月 19 日までの間で行った実験の炉心図を下図に示す。そこでは、制御棒及び安全棒を挿入、以上の調整することで未臨界度を操作し、4 点の未臨界度で実施している。



その実験結果の一部を以下の表に示す。いずれの箔においても十分な結果が得られている。

放射化箔	C/E
In	1.09 ± 0.02
Fe	1.19 ± 0.02
Al	0.97 ± 0.02
Nb	1.13 ± 0.02

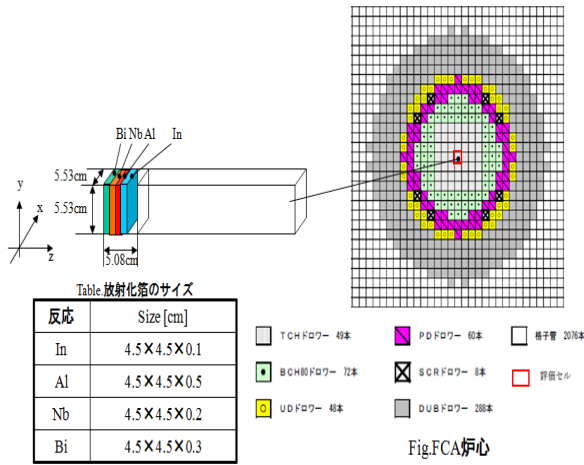
また、実験結果を用いた中性子スペクトルのアンフォールディングを行った結果、ここで用いた 4 つの箔の中で In、Al、Nb の 3 つの箔の組合せにより、高速中性子の中性子スペクトル精度よく導出できることが確認された。In、Al、Nb の 3 つの箔の結果に対してアンフォールディングを用いる方法が、高速中性子スペクトル測定のためには適当であることが分かった。

#### 4. 研究成果

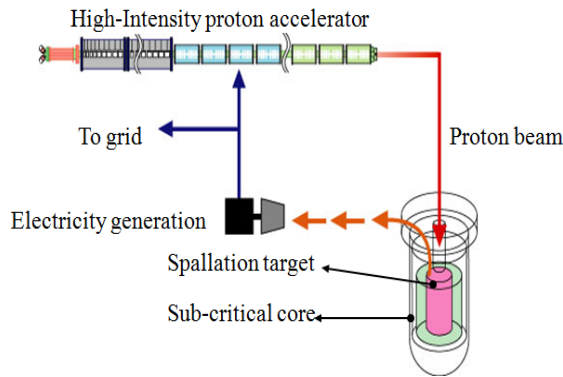
以上の通り、本研究では、高エネルギー中性子測定実験及び高速中性子スペクトル測定実験を行い、放射化法による ADS 炉内の中性子スペクトル測定に有効な測定法を開発した。

本研究では、さらに、ここで開発した方法を実証するための原子炉実験（JAEA の FCA）についても研究を行なった。そこでは、FCA での使用放射化箔及びその設置法、その実験による放射化量を検討し、またモンテカルロ計算コード MVP を用いた模擬計算解析を行なった。その結果、本研究で開発した方

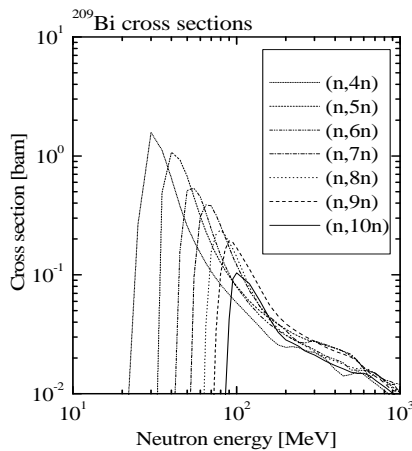
法 (In, Al, Nb) を用いての ADS 炉内エネルギースペクトル監視を実証できる実験が立案された。



以上の成果により、GeV オーダー加速器を用いるハイブリッドシステムの中性子監視法が開発できた。



付録参考図 1



付録参考図 2

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① C. H. Pyeon, M. Hervault, T. Misawa, H. Unesaki, T. Iwasaki and S. Shiroya, “Static and Kinetic Experiments on Accelerator Driven System with 14 MeV Neutrons in Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol, 45, 1171-1182 (2008). (査読あり)

② C. H. Pyeon, Y. Hirano, T. Misawa, H. Unesaki, C. Ichihara, T. Iwasaki and S. Shiroya, “Preliminary Experiments for Accelerator Driven Subcritical Reactor with Pulsed Neutron Generator in Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol, 44, 1368-1378 (2007). (査読あり)

[学会発表] (計 4 件)

① C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki, K. Nakajima and S. Shiroya, “Future Experiments on Minor Actinides Characteristics using Accelerator Driven System in Kyoto University Critical Assembly,” Proc. Actinide and Fission Product Partitioning and Transmutation, Tenth Information and Exchange Mtg., Oct., 6-9, Mito, Japan, (2008). OECD/NEA.

② C. H. Pyeon, H. Shiga, K. Abe, H. Yashima, T. Misawa, T. Iwasaki and S. Shiroya, “Neutron Spectrum Analyses by Foil Activation Method for High-Energy Proton Beam,” Proc. 13-th. Int. Symposium on Reactor Dosimetry, Alkmaar, the Netherlands, May 25-30, (2008).

③ C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki, C. Ichihara and K. Mishima, “Research on Accelerator Driven Subcritical Reactor at Kyoto University Critical Assembly (KUCA),” Proc. Eighth Int. Topl. Mtg. on Nucl. Applications and Utilization of Accelerators (AccApp’07), Jul. 30-Aug. 2, Pocatello, (2007). American Nuclear Society.

④ C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, “Benchmark Experiments of Accelerator Driven Systems (ADS) in Kyoto University Critical Assembly

(KUCA),” Proc. Fifth Int. Workshop on the Utilisation and Reliability of High Power Proton Accelerators (HPPA5), OECD/NEA No. 6259, May, 6-9, Mol, Belgium, (2007). OECD/NEA.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 件)

〔その他〕

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩崎 智彦 (IWASAKI TOMOHIKO)  
東北大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：70184869

### (2) 研究分担者

卞 哲浩 (Pyeon Chol-Ho)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：50362413  
八島 浩 (YASHIMA HIROSHI)  
京都大学・原子炉実験所・助教  
研究者番号：40378972

### (3) 連携研究者