

『連携重点研究』における  
「多重即発ガンマ線分析研究会」成果報告  
2008年2月19日、東海

Proceedings of the Workshop on Multiple Prompt Gamma-ray Analysis  
Tokai, February 19, 2008

(編) 海老原 充\* 初川 雄一 大島 真澄

(Eds.) Mitsuru EBIHARA\*, Yuichi HATSUKAWA and Masumi OSHIMA

原子力基礎工学研究部門  
核変換用核データ測定研究グループ

Innovative Nuclear Science Research Group  
Nuclear Science and Engineering Directorate

JAEA-Review

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（<http://www.jaea.go.jp>）  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

『連携重点研究』における「多重即発ガンマ線分析研究会」成果報告

2008年2月19日、東海

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門核工学・炉工学ユニット

(編) 海老原 充\*、初川 雄一、大島 真澄

(2008年9月19日受理)

独立行政法人日本原子力研究開発機構と国立大学法人東京大学大学院工学系研究科原子力専攻は協力して「連携重点研究」を行っている。「連携重点研究」は原子力機構と大学の研究者が連携し、さらに民間企業等の研究者の参加を募って原子力分野に係る公募型の共同研究を行うもので、保有する人的資源や先進的研究施設・設備などの物的資源、及び外部資金を効率的に活用することにより原子力分野における科学技術振興に寄与するものである。本報告書は平成20年2月19日に開催された『連携重点研究』のテーマのひとつである「多重ガンマ線検出と即発ガンマ線分析によるリアルタイム非破壊超微量元素分析法の開発と実試料への応用」の成果報告会についての発表の概要をまとめたものである。本研究会において新たに開発している多重即発ガンマ線分析(MPGA)用実験装置の設置状況や学術研究、産業利用のための各種試料の分析結果について報告がなされた。この成果報文書は「多重即発ガンマ線分析研究会」において6つのサブグループから発表された9件の発表資料をまとめたものである。

---

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

\*首都大学東京

Proceedings of the Workshop on Multiple Prompt Gamma-ray Analysis  
Tokai, February 19, 2008

(Eds.) Mitsuru EBIHARA\*, Yuichi HATSUKAWA and Masumi OSHIMA

Division of Nuclear Data and Reactor Engineering  
Nuclear Science and Engineering Directorate  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received September 19, 2008)

The workshop on “Multiple Prompt Gamma-ray Analysis” was held on February 19, 2008 at Tokai. It is based on a project, “Developments of real time, non-destructive ultra sensitive elemental analysis using multiple gamma-ray detections and prompt gamma ray analysis and its application to real samples”, one of the High priority Cooperative Research Programs performed by Japan Atomic Energy Agency and the University of Tokyo. In this workshop, the present status and the latest results of the Multiple Prompt Gamma ray Analysis (MPGA) study were presented. This report records the papers and the materials of 9 presentations in the workshop.

**Keywords:** Multiple Prompt Gamma-ray Analysis (MPGA) 、 Neutron Activation Analysis with Multidimensional  $\gamma$ -ray Spectrometry (NAAMG) 、 INAA

---

\*Tokyo Metropolitan University

## 目次

1. MPGА開発の現状		
	大島真澄 .....	1
2. PGA、MPGA のより開かれた利用のためへの利用者からの提言		
	海老原充 .....	12
3. 多重即発ガンマ線分析の環境試料分析への適応性の検討 －MPGA法を用いた底質標準試料および干潟底質試料中のカドミウムの分析－		
	松尾基之、小豆川勝見、藤暢輔、 大島真澄 .....	19
4. 多重即発 $\gamma$ 線分析による高炉スラグ中 Cd の定量		
	伊下信也、平井昭司、鈴木章悟、 岡田往子 .....	32
5. 農産物試料測定と MPGА開発		
	藤暢輔、大島真澄、小泉光生、木村敦、 古高和禎 .....	56
6. NAAMG と MPGАの応用 -産業利用の立場から-		
	須志田一義、谷口舞 .....	64

**CONTENTS**

1. Present Status of Multiple Prompt Gamma-ray Analysis M.Oshima .....	1
2. A proposal for the use of PGA and MPGA M. Ebihara .....	12
3. A Study of the Applicability of Multiple Prompt Gamma-ray Analysis to Environmental Samples-Cd analysis of standard reference materials and tideland sediments by means of multiple prompt gamma-ray analysis method M. Matsuo, K. Shozugawa, Y. Toh, M. Oshima .....	19
4. Determination of Cadmium in blast furnace slag by Multiple Prompt Gamma-ray Analysis S. Inoshita, S. Hirai, S. Suzuki, Y. Okada .....	32
5. Measurement of agricultural products and development of MPGA Y. Toh, M. Oshima, M. Koizumi, A. Kimura, K. Furutaka .....	56
6. Application of NAAMG and MPGA-from a standpoint of industrial use K. Sushida, M Taniguchi .....	64

## 1. MPGA 開発の現状

Present status of Multiple Prompt Gamma-ray Analysis

大島真澄

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村)

**Masumi OSHIMA**

Innovative Nuclear Science Research Group, Nuclear Science  
and Engineering Directorate,  
Japan Atomic Energy Agency

2-4 Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

Keywords ; Multiple Prompt Gamma-ray Analysis, Prompt Gamma-ray Analysis, Multiple Gamma-ray Detection, JRR-3M, J-PARC

JRR-3M で進めている多重即発ガンマ線分析 (MPGA) 装置開発の現状と計画、また最近進展のあった J-PARC における中性子反応測定ビームラインと MPGA の利用計画について紹介する。現在ほぼ計画通りに進行中である。

### 1. JRR-3M における MPGA の現状と計画

NEDO 外部ファンド (代表 : 原子力機構藤暢輔、H16.10-H18.9、3 年間) を獲得し、原子力機構整備分と合わせ、平成 19 年 12 月にクローバ検出器の 8 セットが揃った。高速データ収集装置の開発がほぼ完了した。従来と同程度の分解能で、処理時間  $6 \mu\text{秒}$  という 10 倍以上の高速化が図られた。自動運転を可能にする液体窒素供給装置を整備し、調整を行った。核種毎のガンマ線データベース (db)・定量ソフトの開発において、db は核構造研究の一環として整備をスタートさせた。定量ソフトは来年度以降になる。

H19 年度より JST 地域イノベーション育成研究がスタートし、上記クローバ検出器 8 台に加え、同軸型検出器 4 台を増設する。データ収集及び定量ソフトウェアの開発を進める。整備と並行して、連携重点研究のメンバーによる MPGA の一部利用を始めると同時に、一般利用では同軸型検出器 1 台による PGA の利用 (ビームタイム 30 %まで) を可能にした。H19 年度には定量ソフトウェアの開発を進めるとともに、連携重点メンバー (機構含む) と、外部ユーザーによる利用を図った。

H20 年度には MPGA システムを完成させ、連携重点研究メンバー (機構含む) と外部ユーザーによる本格的利用を可能にする。

## 2. J-PARCにおけるMPGA開発の現状と計画

H16年8月に宇宙核物理・核変換用核データ研究グループと共同で提案したJ-PARC中性子核反応実験装置が採択され、ビームライン建設の権利が認められた。3年以内の建設予算獲得が推奨された。これを受け、いくつかの大型ファンドへ提案を行い、H17年8・10月にJST公募型特会事業「高強度パルス中性子源を用いた革新炉用原子核データの研究開発」(H17・21の5年間、直接経費12.6億円、代表：北大鬼柳、副代表：東工大井頭・JAEA大島、連携5機関、参加者約70名)が採択された。H19年度までに、J-PARC物質生命科学実験施設(MLF) #4ビームラインに中性子基本遮蔽体、ビームストップ、T0チョッパ、ディスクチョッパー、中性子フィルタ、Geスペクトロメータ用検出器架台、検出器シールド、サンプルチェンジャー等を設置する予定である。

今後H20年度にビームコミッショニング、テスト実験、中性子捕獲断面積測定実験を実施する。文科省からの指導では、平成22年度以降特会事業終了後は、核データ研究を中心に、原子力機構のミッションとしての核種分析研究、核物理研究などを展開することが予定されている。このことは決定事項ではなく、今後も注視していく必要がある。

## 3. MPGA利用に関する提言

MPGA装置は、当研究会の目的である連携重点研究に参加する大学・研究機関による学術研究と企業による産業利用に有用な装置と考えられる。また原子力機構核変換用核データ測定研究グループ(以降 核データG)でのプロパーアリ研究にも使用する。これらを発展させるため、大学・研究機関、企業、核データGの3者による連携が必要で、3者による以下の分担が望ましいと考えています。

- 大学・研究機関： 原子力機構との共同研究等により学術研究を実施。ハード、ソフトなどの支援に対し、共著論文、論文引用で答える。最新成果を企業にフィードバック。ニーズに関する情報を企業から得る。
- 企業： 原子力機構との共同研究等により依頼分析を実施。ハード、ソフトなどの支援に対し、装置維持予算を支援。大学・研究機関から最新成果を得ると同時に、ニーズに関する情報を大学・研究機関に与える。
- 原子力機構： 共同研究等による利用のために、ハード、ソフトなどの開発を行い、利用支援を行う。また、大学・研究機関、企業と共同研究を実施する。

以上

## MPGA開発の現状

原子力機構 大島真澄

### ● JRR-3Mにおける多重即発ガンマ線分析の現状

- ・ハードウェア → 藤発表
  - \* 多重ガンマ線検出装置と付帯装置
- ・オンラインソフト
  - \* エネルギー較正と定量ソフト
- ・データベースと検量線 → 村上発表

### ● JRR-3Mにおける今後の計画

### ● J-PARCにおける施設開発

### ● NAAMG,MPGA利用の問題点と対策

1/17

## JRR-3Mにおける多重即発ガンマ線分析の現状

### ● H19.3以前

- ・検出器8台用の多重ガンマ線検出装置架台を整備。
- ・データ収集基本システムを整備。

### ● H19.4-9

- ・検出器7台の多重即発ガンマ線検出装置を完成。
- ・検出器7台用の液体窒素自動補給システムを整備。

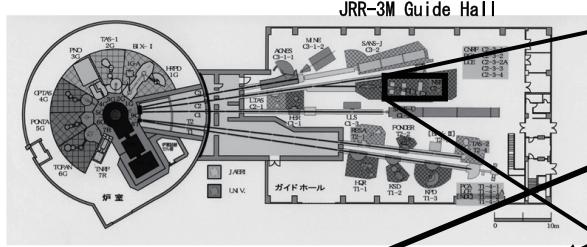
### ● H19.10-12

- ・検出器7台の多重即発ガンマ線検出装置を用いた試験を実施。
- ・液体窒素自動補給システムの試験完了。
- ・7台用データ収集基本システムの試験。分解能を改善中。
- ・オンラインソフトの開発
  - \* エネルギー較正(ゲイン変動補正用)
  - \* 定量ソフト(1次元、2次元解析a版)

2/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## Real World: MPGA apparatus, STELLA, in JRR-3M



**JRR-3M Guide Hall**

Reactor Power: 20 MW

In 2004 C2-3-2 beam line completed  
In 2006 neutron bender improved  
Neutron intensity:  $1.4 \times 10^7 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$   
Beam size:  $2\text{cmW} \times 3\text{cmH}$

**Sample changer**  
150 samples can be changed swiftly.

**Liq. N<sub>2</sub> supply system**  
Fully automatic liq. N<sub>2</sub> filling is possible.

**For MPGA apparatus, see also Toh[A106]**

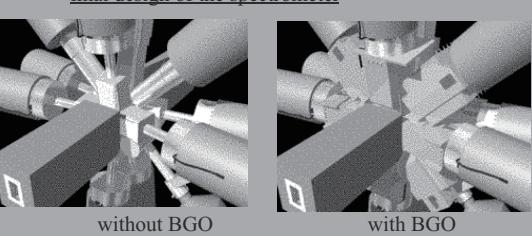
3/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

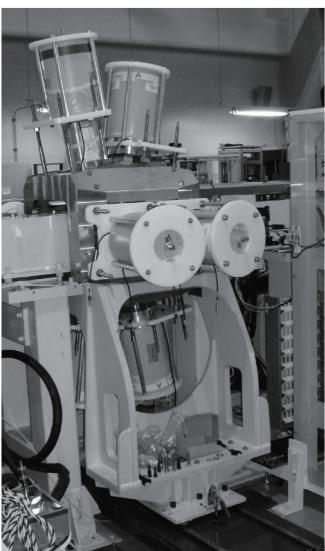
## A $\gamma$ -ray detector array for MPGA, STELLA

From the simulation result we have adopted the design composed of eight Canberra-Eurisys back-catcher-type clover-type, two twin-type and two coaxial-type detectors. The device is now under construction at JAEA Research Reactor facility, JRR-3. It will be used for interdisciplinary research: nuclear structure, nuclear data (neutron capture cross section measurement), and trace element analysis (Multiple Prompt Gamma-ray Analysis and Neutron Activation Analysis).

final design of the spectrometer



without BGO      with BGO



4/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## 高速データ収集システム

多重ガンマ線検出装置GEMINI-II

GEMINI-II用データ収集系

新開発全立体角Geスペクトロメータ用データ収集系

●同時計数収集速度	3 kevents/sec	100 kevents/sec	30倍改善
●エネルギー分解能	2.4 keVFWHM at 1.3 MeV	2.5 keVFWHM at 1.3 MeV	同等
●コスト	200万円/ch	50万円/ch	4倍改善
●スペース	3ラック/19ch	1/3ラック/30ch	15倍改善
●安定性	× (コネクタによる接触抵抗)	○ (コネクタ不使用)	改善
●拡張性	× (CAMACバス)	○ (ADC, DSPチップの高速化)	改善

従来のシステムに比べ、収集速度、コスト、スペース、安定性等で優れている。  
同種装置への応用が期待される。

5/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## 液体窒素自動供給システムの開発

液体窒素自動供給システム

多重ガンマ線検出装置は液体窒素を1日40L以上消費。また、1日2回補給する必要がある。本システムにより、液体窒素貯槽からの取り出し、運搬、補給の手間をなくし、ロードを大幅に低減。

液体窒素自動供給装置 (60L/day)

液体窒素自動補給装置  
1日2回自動補給

多重ガンマ線検出装置GEMINI-II (タンデム加速器施設)

多重即発ガンマ線分光装置STELLA (JRR-3M施設)

全立体角Geスペクトロメータ (J-PARC MLF施設)

6/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## オンラインソフトウェアの開発

---

エネルギー較正ソフト

- ・定常的なデータ収集ボードのゲイン変動を較正するため、1日1回程度標準試料あるいはガンマ線標準線源を用いた測定を行う。
- ・測定後、得られた各検出器ごとの1次元スペクトルデータのピーク解析をオンラインで行い、既知のエネルギーから較正式を作成。
- ・結果をファイルに保存し、オンライン定量ソフトから参照可能にする。
- ・H19年度に $\alpha$ 版、H20年度に $\beta$ 版作成。

定量ソフト

- ・核種毎の1次元、2次元ガンマ線データベースを作成しておく。
- ・ガンマ線測定と同時に、エネルギー較正データを読み込み、1次元スペクトル・2次元マトリクスを作成。
- ・測定後、オンラインでピーク解析し、多元素について定量結果を出力。
- ・H19年度に $\alpha$ 版、H20年度に $\beta$ 版作成。

7/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## エネルギー較正ソフト①

---

エネルギー較正メイン画面

メイン画面(パラメータ等設定画面)、及びエネルギー較正結果一覧画面を作成した。測定データ及びパラメータの入力、ピーク検出、ピークフィッティング、エネルギー較正係数及び誤差を算出するプログラムを開発した。

エネルギー較正条件を入力

- ・較正用標準試料 : N-14
- ・ガンマ線標準線源 : Ba-133, Co-60, Eu-152
- ・較正曲線の次数を入力
- ・使用するゲルマニウム検出器

8/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## エネルギー較正ソフト②

第2画面

検出器毎に全体のスペクトルとピークフィッティングの結果を表示。

IDL

Source : Co-60

Counts

Energy (keV)

Counts

Energy (keV)

Counts

Energy (keV)

エネルギー較正曲線 戻る

9/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## エネルギー較正ソフト③

最終画面

全ての検出器についてフィッティングした結果を表示。  
フィットした幕級数の初めの2つの計数とフィッティング誤差も表示し、一目で結果が分かる。

	$\chi^2$	係数A0	係数A1		$\chi^2$	係数A0	係数A1	
1	0.0194	-2.9045	1.50761		21	-	-	
2	0.0944	-2.1944	1.48604		22	0.0111	-2.4975	1.50427
3	0.0221	-2.3320	1.47775		23	0.0265	-1.7801	1.52006
4	0.0643	-2.5366	1.48472		24	0.0940	-1.9175	1.47769
5	0.1061	0.0607	1.49426		25	0.0400	-1.6875	1.48603
6	0.0119	-2.5095	1.47210		26	0.0344	-2.7930	1.50499
7	0.0015	-2.3998	1.51583		27	0.0564	-2.0043	1.50292
8	-	-	-		28	0.0823	-2.0285	1.49986
9	0.0050	-1.1523	1.47684		29	0.0524	-2.8957	1.52473
10	0.0866	-1.3275	1.49838		30	0.0192	-2.9365	1.48798
11	0.0124	-2.6387	1.53901		31	0.1042	-2.6807	1.50383
12	0.1204	-2.3462	1.49337		32	0.0769	-3.1757	1.49714
13	0.2272	-2.9487	1.50344		33	-	-	-
14	0.1398	-2.9628	1.48862		34	-	-	-
15	0.2040	-3.3283	1.51195		35	-	-	-
16	0.0942	-2.9473	1.48178		36	-	-	-
17	-	-	-		37	-	-	-
18	0.1005	-1.0573	1.50638		38	-	-	-
19	0.2838	-2.4694	1.52069					
20	0.1077	-2.0814	1.51559					

エネルギー較正結果一覧表 戻る

10/17

## JRR-3Mにおける多重即発ガンマ線分析の今後の計画

### ● ハードウェア開発

- ・検出器の増設(既存検出器3台プラス、3月、9月にJST検出器各1台)
  - 多重即発ガンマ線分析装置STELLAの完成
- ・データ収集システムの調整、最適化。(-H20.10)
- ・液体窒素自動補給システムの調整、最適化。(-H20.10)

### ● ソフトウェア開発

- ・エネルギー較正ソフトの改良(-H20.6)
- ・1次元、2次元解析ソフト $\beta$ 版の開発(-H20.12)
- ・3次元解析ソフトの $\alpha$ 版の開発(-H20.12)
- ・多重ガンマ線データベース作成(1次元、2次元、3次元法)
- ・定量の実際例をデータベース化
- ・未知試料について定量限界を予測するソフトの開発

11/17

## J-PARCにおける施設開発

### H19まで

- ・JST公募「原子力システム技術開発事業」により、北大、東工大とともに、J-PARC物質生命科学実験施設BL04に、中性子核反応測定ビームラインを整備

### H20, 21の計画

- ・MEXT公募事業で整備した全立体角Geスペクトロメータを設置。
- ・データ収集装置、液体窒素自動補給装置、サンプルチェンジャー等の付帯設備はJRR-3MのSTELLAとほぼ同じ仕様で整備。
- ・H21年度まではJST公募事業で使用。

### H22以降

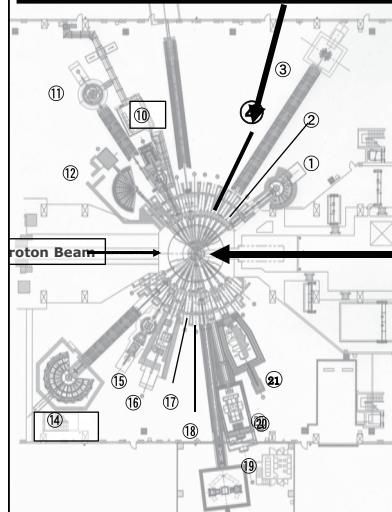
- ・多重即発ガンマ線分析を含む一般利用開始。

12/17

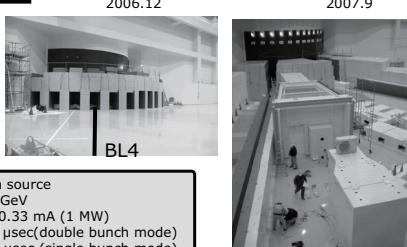
**An innovative high intensity neutron beam facility at J-PARC(MLF)**



**Neutron Nucleus Reaction Beam Line (BL4)**



2006.12      2007.9



**Spallation neutron source**  
**Proton energy : 3 GeV**  
**Proton Intensity : 0.33 mA (1 MW)**  
**Beam width : 0.7 usec(double bunch mode)**  
**0.1 usec (single bunch mode)**  
**Repetition rate : 25 Hz**  
**Neutron production :  $2 \cdot 10^5$  n/secusec/sample at 1keV**

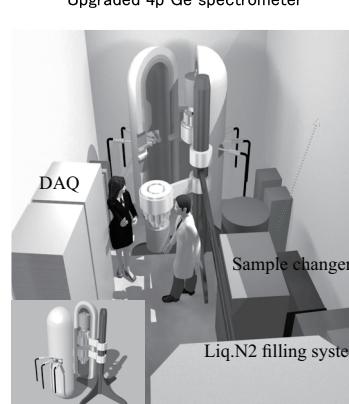
In 2003 we, NAA group, have proposed a MPGA Beam Line in collaboration with nuclear data and nuclear astrophysics group.  
In 2004, this proposal has been approved by the J-PARC committee.  
In 2006 the proposal by the nuclear data group for innovative nuclear systems has been approved by JST.  
**In 2007 we will construct the major part of the facility.**  
**In 2008 the construction will complete and beam commissioning will start.**  
**In 2010 the facility will be transferred to J-PARC center.**

13/17

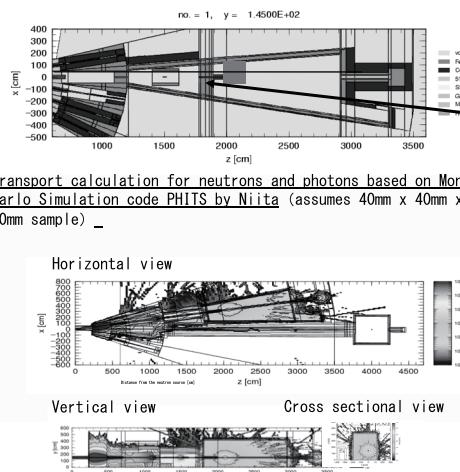
連携重点研究会 2/19/2008      JAEA Japan Atomic Energy Agency

## Layout of the new beam line at J-PARC MLF including the $4\pi$ Ge spectrometer

Upgraded 4p Ge spectrometer



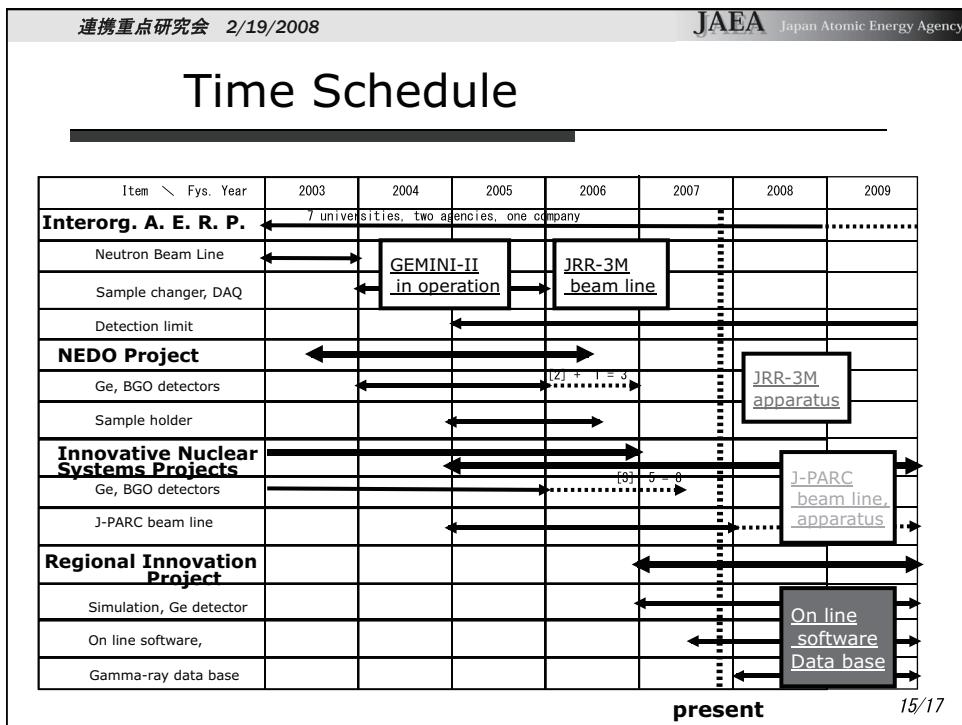
no. = 1, y = 1.4500E+02



Transport calculation for neutrons and photons based on Monte Carlo Simulation code PHITS by Niita (assumes 40mm x 40mm x 40mm sample) -

Horizontal view      Vertical view      Cross sectional view

14 /17



連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## NAAMG,MPGA利用の問題点と対策

### 問題点

MPGAはこれからであるが、既に供用を開始しているNAAMGの利用が進まないのは、以下の問題がある。

- ・データ解析に機構側のサポートが必要であり、ユーザーにとってバリアが高い。
- ・機構側ではマンパワー・時間の制約のため受け入れに限度がある。また、研究成果が重要、施設供用のみでは評価されない。
- ・分析装置の維持費をどう捻出するかも問題。

### 対策

- ・オンライン定量ソフト、マニュアルの整備により、両者の負担を軽減。
- ・大学、企業、原子力機構で長続きのする連携関係を構築したい。

16/17

連携重点研究会 2/19/2008 JAEA Japan Atomic Energy Agency

## 大学、企業、原子力機構の連携

大学、企業、原子力機構で長続きのする連携関係とは？

The diagram illustrates the long-term collaboration between three entities:

- 大学・研究機関・他部門 (学術研究)** (University, Research Institutions, Other Departments (Academic Research))
- 企業 (産業利用)** (Enterprise (Industrial Utilization))
- 原子力機構  
原子力基礎工学研究部門  
(プロパー研究・装置の維持)** (Nuclear Research Institute  
Nuclear Basic Engineering Research Department  
(Proprietary Research · Equipment Maintenance))

The relationships are represented by arrows:

- Between University and Enterprise:
  - Upward arrow: 研究シーズ (Research Themes)
  - Downward arrow: 人材育成 (Human Resource Development)
- Between Enterprise and Research Institute:
  - Upward arrow: 分析手段を提供 (Provide Analysis Tools)
  - Downward arrow: 装置維持費用 (Equipment Maintenance Costs)
- Between University and Research Institute:
  - Upward arrow: 共著成果、論文引用 (Co-authored Results, Paper Citations)

17/17

## 2. PGA,MPGA のより開かれた利用のためへの利用者からの提言

**A proposal for the use of PGA and MPGA****海老原充**

首都大学東京大学院理学研究科分子物質化学専攻

〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1

**Mitsuru EBIHARA**

Department of Chemistry, Graduate School of Science and Engineering,

Tokyo Metropolitan University

1-1 Minami-Ohsawa, Hachioji, Tokyo 192-0397 Japan

In addition to a PGA system, a new PGA system called a MPGA system will be able to be used in 2008. The MPGA system has many significant features in analytical ability and is expect to work complementarily to PGA. Although PGA has been successfully used by many researchers, there are several issues to be solved for its better cooperative use. Such problems could also be potential problems even for MPGA. To prevent them from being repeated with MPGA, we have to share common experience and information.

**Keywords:** Prompt gamma ray, PGA, Coincidence measurement, Multiple Ge detectors, MPGA, JRR-3M, INAA

## 1. はじめに

連携重点研究のプログラムの一環として建設が進められてきた多重即発ガンマ線分析（以下、MPGA と略記）による高感度元素分析装置も完成までもう一歩の段階にある。この装置が非破壊元素分析装置として非常に優れた性能を持つであろうことは疑う余地のないところである。日本原子力研究開発機構の3号炉の中性子ガイドビームラインには、熱中性子を利用する即発ガンマ線分析（以下、PGA と略記）装置が設置されており、広く利用してきた。昨今、産業利用への積極的な働きかけにより、従来のマシンタイムの過密な状況に追い打ちをかけるがごとく、さらに逼迫した状況を出来させている。このような状況に対して、MPGA の完成は大きな解決策をもたらすものと期待される。

中性子を利用する元素分析法である中性子放射化分析にとって PGA、およびその類縁の MPGA はむしろ特殊な手法であり、いわゆる炉内照射を利用する分析法が遙かに広く利用されている。この炉内照射を伴う中性子放射化分析法のうちでも機器中性子放射化分析法（以下 INAA と略記）は PGA, MPGA 同様、非破壊分析が特徴である。いかにおいて、この原子炉中性子を用いた非破壊分析法をより良く利用できるようになるためにはどのようなことが考えられるのか、という点に関して一利用者からの提言という形で意見を述べる。この提言は、翻って、MPGA の効率的な利用、さらには研究原子炉の持続的利用に多少ともプラスの効果を持つことを期待して行うものである。

## 2. PGAs vs. MPGAs

PGA と MPGA はともに原子核が中性子を捕獲する際に極短時間に放出する即発ガンマ線を測定することによって行う元素分析法である。その性格上、中性子を照射しながら測定する必要があり、炉内中性子照射による INAA と大きな相違点となる。現在稼働中の PGA 装置は原研（当時と大学研究者との協力の下に

JAA-3 の改修にあわせて建設され、始めの段階では協力研究として、その後、東大原子力研究総合センタ（当時）の原研施設利用共同研究と協力研究の 2 本立てで利用が進められてきた。原研から日本原子力研究開発機構（以下、JAEA と略記）に組織が変わるためにあわせて、PGA 施設の産業利用促進の声が高まり、その結果、それまでの十分とは言いがたかったマシンタイムがますます逼迫する状況に至っている。一方、MPGA は大学と原研に間に実施された新しい共同研究プログラムである連携重点研究の 1 課題として平成 15 年度から開始された。この時ちょうど熱中性子ライン C-2 が改修されることになり、それにあわせて、即発ガンマ線分析用に固定のピームポートを設置する案が認められた。それにあわせて、それまで冷中性子ラインと熱中性子ラインを交互に使っていた PGA 装置が熱中性子ライン T-1 に固定して設置されることになった。

PGA と MPGA に分析装置としての特徴は共通点もあるものの、それぞれ異なる点も少なくない。最大の違いの一つは測定できる試料の大きさであり、PGA では考古学資料や隕石試料などの大きな試料を物理的に壊すことなく、そのままの大きさで分析できるのに対して、MPGA では少量の試料を数多く測定するのに向いていて、そのために自動試料交換機を利用して、無人で試料の交換や測定ができる。この点からも、MPGA は 2 台目の PGA 装置ではなく、両者はそれぞれの特徴を発揮しながら、補完的に利用される装置となる。

### 3. 現状の問題点

今後の MPGA-PGA の相補的利用を推進していく上で、現状での問題点、特に PGA 利用に関する問題点を考えることは非常に大事なことである。現在の PGA 利用上の最大の問題点はマシンタイムの制約である。それを解決する、あるいはその問題を少しでも緩和する方策は、炉内照射に比べて元々非効率的な PGA をいかに効率よく利用し、成果を上げるか、ということを真剣に考えたマシンタイムの割当にある。現在、PGA の利用形態が多様化して、従来のようなマシンタイム配分の妥当性が見えにくい状況にある。今後、是非ともこうした状況を改善して、利用者間でできるだけ見通しのよい環境を作ることが求められる。MPGA の利用に関しては PGA とは異なる制約が課せられることになろうと推察されるが、将来的には現在 PGA に見られる問題が再現される懸念は十分ある。PGA も MPGA も JAEA の装置であることと同時に日本に 1 つしかない装置であることを前提に、より良い成果を得られる為にどう利用されるべきか、という観点でマシンタイムを含めた利用形態を議論すべきであろう。

別の側面での問題点として、測定に関する基礎データの公開が研究者間で進んでいないのではないか、ということである。きわめて卑近な例として、岩石中のマグネシウムの定量を取り上げる。マグネシウムはほとんどの岩石で主成分元素の一つであるが、その即発ガンマ線のエネルギーは早くから測定され、公表されているものの、実際の定量値として公表される例は少ない。特に、比較標準試料で公表されない点が問題であり、明らかに定量値が推奨値と一致しないためにデータの公表を控えていると判断される。しかし、これまでその問題点を論文等で指摘された例を見ない。これは、明らかに研究者間での情報共有が欠けていることに起因しており、しかも、故意に情報を公表しないのではと疑われる状況にあったことが大きな問題点である。MPGA の今後健全に、効率的に利用されるためには、このような PGA にまつわる問題点を解消すべく、研究者間での情報交換を密にすることが重要である。

中性子を利用した非破壊分析装置の将来計画  
～PGA, MPGАのより開かれた利用の為に～

「利用者からの提案」

首都大学東京 大学院理工学研究科  
海老原充

*Outline*

1. PGAとMPGAの現状認識(利用者の立場からの)
2. 現状の問題点
3. 提言

PGA vs. MPGА (1)

*PGA*

(現状) 完成した分析手法として利用  
(経緯) 大学と原研(当時)の協力により発足(JRR-3改修  
にあわせて)  
↓  
協力研究(原研)  
↓  
原研施設利用共同研究(大学)と協力研究(原研)  
↓  
原子力機構施設利用共同研究と施設共用研究

*MPGA*

(現状) 開発途中  
(経緯) 大学－原研連携重点研究(C2ラインビームライン  
改修にあわせて)

## PGA vs. MPGA (2)

### PGA

小型試料(ビームサイズ以下)  
大型試料  
隕石  
考古学的試料  
有人による試料交換

### MPGA

Auto-sample changer導入による、多試料無人測定  
小型試料(粉末)  
coincidence測定→高選択制→高感度  
multi-collectors→高感度



**Complementarily working**

## 1. マシンタイムの割り当ての妥当性

### PGA

産業利用  
一般利用 所内  
所外(施設共用研究－JAEA产学連携推進部)  
所外(施設利用共同研究－東大原子力専攻)

### MPGA

連携重点研究(開発グループ枠)  
施設共用研究

利用枠毎の配分  
利用者間での配分 } 妥当性



基準の設置  
業績評価

## 2. 利用者間での情報の共有の有無

(例) 岩石試料のPGA

1 主成分元素マグネシウムのデータ欠落

PGAにおける最適エネルギーの選択  
→現在でも模索中

研究者間での情報公開(論文), 情報交換(学会)



データベースの確立

Table 2 Normalized analytical sensitivity, interferences of elements and background of the recommended  $\gamma$ -ray lines ( $A\sqrt{\pm\alpha_{\text{rel}}}$ )

Element	$E_\gamma/\text{keV}$	Normalized analytical sensitivity <sup>a</sup> /cps mg <sup>-1</sup>	Interference element and equivalent amount <sup>b</sup>	Background equivalent amount <sup>c</sup> / $\mu\text{g}$
H	2224	0.0198 ± 0.0030		
B <sup>d</sup>	478	12.1 ± 9.5	Na ((3.1±0.1)×10 <sup>-4</sup> ), Co ((2.0±0.3)×10 <sup>-4</sup> ), Sr ((4.7±2.0)×10 <sup>-4</sup> ), Cd (0.0012±0.0001)	34 ± 8 0.0296±0.0073
C	1262	(9.38 ± 0.68)×10 <sup>-4</sup>	Si (0.11±0.08), Fe (12±0.7), Sm (2200±670), Gd (20000±13000), Hg (1000±220)	13000 ± 340
N	1885	(6.96 ± 0.44)×10 <sup>-5</sup>	Na (0.16±0.05), Ti (0.81±0.10)	290 ± 110
Na	92	0.00483±0.00017	Sr (0.0010±0.0002)	
Mg	2828	(4.44 ± 2.3)×10 <sup>-5</sup>		
Al	1779	(5.64 ± 0.23)×10 <sup>-4</sup>	Sr (0.019±0.002)	64 ± 5
Si	3540	(1.59 ± 0.077)×10 <sup>-4</sup>	Sr (0.019±0.002), K (0.12±0.03), Ti (0.063±0.014), Gd (560±170)	
P	637	(1.47 ± 0.13)×10 <sup>-4</sup>	K (0.15±0.009), Ti (0.024±0.004)	
S	841	0.00131±0.000079	Mg (0.01±0.002), K (0.072±0.002), Mn (0.04±0.009), Sr (0.003±0.0012)	
Cl	766+788	0.0240 ± 0.0014	Al (0.00615±0.00094), Co (0.17±0.04), Sr (0.0033±0.0004), Gd (35±15)	4.5 ± 2.0
K	770	0.00292±0.000042		
Ca	1942	(5.29 ± 0.11)×10 <sup>-4</sup>	P (0.015±0.009), Ti (0.024±0.004)	
Ti	1381	0.00861±0.00074	Mn (<0.003), Co (0.013±0.003), Sr (0.001±0.001), Sm (0.93±0.34)	
Mn	212	0.0105 ± 0.0009	Ni (0.001±0.0003)	
Fe	352	0.00117±0.000082	S (0.0098±0.0010), Cu (0.0044±0.0005), Mn (0.29±0.05), Co (0.31±0.06), Sr (0.002±0.0003), Gd (18±7)	
Co	230	0.0363 ± 0.0045	Mn (0.010±0.001), Fe (0.0042±0.00024), Sr (1.5±0.5)×10 <sup>-4</sup>	
Gd	558	2.08 ± 0.15	Co (0.0059±0.0014), Sm (0.0052±0.0006)	0.025 ± 0.005
Sm	334	5.31 ± 0.39	Mn (0.7±0.8)×10 <sup>-4</sup> , Sr ((8.2±1.9)×10 <sup>-4</sup> )	
Gd	182	18.0 ± 0.64		
Hg	368	0.304 ± 0.013	Ca (1.0±0.4)×10 <sup>-4</sup> , Fe (6.4±2.0)×10 <sup>-4</sup> , Co ((3.2±0.2)×10 <sup>-4</sup> ), Sr ((9.1±1.2)×10 <sup>-4</sup> )	

ANALYTICAL SCIENCES AUGUST 1996, VOL. 12

69

Table 3 Analytical results ( $A\sqrt{\pm\alpha_{\text{rel}}}$ ) of geological reference materials

Element	Basaltic Rock (GSJ-JB-1)		Granitic Rock (GSJ-JG-1)	
	This work ( $n=7$ )	1994 Compiled value <sup>a</sup>	This work ( $n=4$ )	1994 Compiled value <sup>a</sup>
H %	0.160±0.029	0.14 <sup>b</sup> , 0.10 <sup>b</sup>	0.0594±0.0023	0.060 <sup>b</sup> , 0.0078 <sup>b</sup>
B <sup>d</sup> $\mu\text{g/g}$	10.7 ± 2.2	9.35	5.7 ± 0.45	6.87
Na %	2.21 ± 0.26	2.05	2.63 ± 0.18	2.51
Al %	8.85 ± 0.44	7.69	8.17 ± 0.30	7.54
Si %	26.4 ± 1.7	24.48	33.9 ± 2.1	33.80
K %	1.39 ± 0.07	1.19	3.56 ± 0.19	3.30
Ca %	7.43 ± 0.49	6.61	1.58 ± 0.59	1.57
Ti %	0.292 ± 0.036	0.79	0.187 ± 0.008	0.18
Mn %	0.131±0.018	0.118	0.0551±0.0047	0.049
Fe %	6.84 ± 0.38	6.29	1.48 ± 0.063	1.52
Sm $\mu\text{g/g}$	5.63 ± 0.19	5.13	4.50 ± 0.51	4.62
Gd $\mu\text{g/g}$	4.75 ± 0.21	4.90	4.3 ± 0.32	4.28

a. Ref. 15. b. Contents of "combined" ( $\text{H}_2\text{O}'$ ) form H. c. Contents of "moisture" ( $\text{H}_2\text{O}'$ ) form H. d. Ref. 12.

Yonezawa (1996)  
Anal. Sci. 12, 605-613.

### 3. 「中性子利用による非破壊分析＝PGA」の図式の妥当性

非破壊中性子放射化分析  
機器中性子放射化分析(INAA)  
即発 $\gamma$ 線分析(PGA)

東大原子力専攻を窓口とするJAEA施設利用総合研究

平成19年度採択課題

一般共同研究81件

NAA 37件

PGA 8件

連携重点研究1件(MPGA)

### 4. 分析法の優位性の正しい認識に基づく分析法の選択

PGAの優位性

1. 低中性子線束
2. 大型試料の非破壊分析
3. データ取得の迅速性

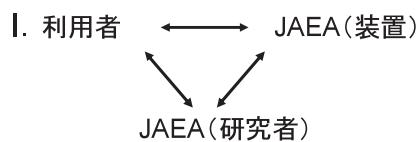
INAAの優位性

1. 多試料、多元素分析
2. 高確度分析

MPGAの優位性

1. 多試料分析
2. 高感度、高確度分析
- (3. PGAに挙げた1および3)

## 提言



3者の連携強化

## II. 利用枠の決定

### 共通の場で議論

→少なくともコンセンサスが得られるように

#### 何が重要か？

1. 産業利用の活性化
2. 成果の正しい評価



共に炉の活性化へ

## III. 代表的中性子利用非破壊分析法であるINAAの利用促進

→ 外部ユーザー対応の組織の設置

### UMRR方式

専任ポスドクの確保

INAAを利用する研究者

外部ユーザ利用料金による人件費確保

外部ユーザとの共同研究による成果の蓄積

### KAERI, Nuclear Malaysia方式

研究所員が外部ユーザーの利用を援助

組織の風通しの良さ

正しい評価

→ 炉の永続性

炉の利用の効率化

**3. 多重即発ガンマ線分析の環境試料分析への適応性の検討**  
—MPGA 法を用いた底質標準試料および干潟底質試料中のカドミウムの分析—

**A Study of the Applicability of Multiple Prompt Gamma-ray Analysis  
to Environmental Samples**  
**— Cd analysis of standard reference materials and tideland sediments  
by means of multiple prompt gamma-ray analysis method —**

**松尾 基之<sup>1</sup>、小豆川 勝見<sup>1</sup>、藤 暢輔<sup>2</sup>、大島 真澄<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> 東京大学大学院総合文化研究科 広域科学専攻

〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1

<sup>2</sup> 日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核変換用核データ測定研究グループ

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

**Motoyuki MATSUO<sup>1</sup>, Katsumi SHOZUGAWA<sup>1</sup>,  
Yosuke TOH<sup>2</sup>, Masumi OSHIMA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Department of Multidisciplinary Sciences, Graduate School of Arts and Sciences,  
The University of Tokyo

3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

<sup>2</sup> Innovative Nuclear Science Research Group, Nuclear Science and Engineering Directorate,  
Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirane Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

**Keywords:** **Multiple Prompt Gamma-ray Analysis, Environmental Samples, Cadmium Content, Standard Reference Materials, Tideland Sediments**

## 1. はじめに

多重即発ガンマ線分析法(MPGA 法)は、非破壊で高感度に多元素を同時に測定することが可能であり、高い分析効率をもつことが見込まれる。本研究では、MPGA 法を実際の試料として環境試料に適用し、これまで利用してきた分析法との比較を行い、効率性・信頼性等を多方面から評価することを目的とする。

我々は、これまで種々の固体環境試料および、地球化学的試料について、その中に含まれる元素の量および、その存在状態(特にメスバウア一分光法を用いた鉄の化学状態分析)により、試料が置かれていた環境や試料の起源・成因等の推定を行ってきた。その際、出来るだけ多くの元素の定量値を得ることが望ましく、そのためには機器中性子放射化分析(INAA)や即発  $\gamma$  線分析(PGA)を行ってきた。本研究では、特に環境中の有害元素として Cd に着目し、従来の PGA 法では検出限界以下であった、干潟底質中の Cd を定量することを目指している。そのための第一歩として、昨年度までは、Cd 含有量が既知の環境標準試料等の測定を行ってきたが、本年度は検出効率の向上が見られ、実際の環境試料として北十間川および谷津干潟底質中の Cd の定量を試みたので報告する。

## 2. 実験

a. 試料 底質試料の採取地点は、環境負荷の高い都市河川として東京都の内部河川である北十間川を選び、東京湾内でも比較的自然の状態が残っている場所として千葉県谷津干潟(ラムサール条約登録地)を選んだ。また、Cd 含有量が既知の環境標準試料として、地質調査所発行の琵琶湖 Lake Sediment (JLK-1) および国立環境研究所発行の Pond Sediment (NIES Certified Reference Material No. 2) を選んで測定に供した。以後、単に前者を JLK、後者を JPS と呼ぶことにする。試料として、約 200mg を精秤し、錠剤成形器を用いて約  $100 \text{ kgf cm}^{-2}$  の圧力で 5 分程度置き、直径 10mm、厚さ約 1 mm のペレットに成型した。

b. 検出器のセットアップ ガンマ線検出器としてクローバー型 Ge 検出器 8 台、そのコンプトンサプレッサーとして BG0 検出器を 8 台用いた。クローバー検出器は測定試料から検出器表面までの距離が約 5 cm となるように設置し、BG0 検出器はクローバー検出器を取り囲むように設置した。検出効率は、3 インチ  $\phi \times 3$  インチの NaI 検出器に対してクローバー検出器 1 台当り 120% (4 クリスタル) で、30 クリスタル合計で約 900% である (絶対検出効率は、推定約 4 %)。

## 3. 結果および考察

従来の PGA 法(Thermal 9000 秒)では、JLK、JPS とも Cd のピークはほとんど判別できない状態であった。これに対し、昨年度に実施した MPGA 装置による同時計数測定(クローバー型 Ge 検出器 4 台、14~19 時間)では、検出効率が悪いながらも、Cd 含有量 0.57ppm の JLK の定量を行うことができた。ただし、ピークの取り方のわずかな違いにより定量値が異なり、値が 40% 程度ずれることもあった。本年度は、上述のセットアップにより検出効率を上げ、同時計数測定を行った。その時の測定条件および結果を図に示した。

JPS および北十間川の 2 次元マトリクス全体図を見ると、Cd ガンマ線ペア (558.5–651.3 keV) の位置に、明らかなピークの存在が確認された。一方、JLK および谷津干潟の 2 次元マトリクスを見ると、拡大図でもピークは判別しにくいが、射影スペクトルでは、明らかなピークが確認された。参考までに、昨年度に測定した JPS および北十間川の Cd ガンマ線ペアの射影スペクトルも図に示したが、両者を比べると、本年度の検出効率の向上が著しいことがよく分かる。そこで、JPS の Cd 含有量が 0.82ppm であることを用い、他の 3 試料の Cd 含有量の定量を行った。その結果、北十間川底質は  $8.4 \pm 1.6$  ppm、谷津干潟底質は  $0.46 \pm 0.14$  ppm、JLK は  $0.44 \pm 0.23$  ppm という値が得られた。谷津干潟と JLK の定量値がほぼ同じなのに誤差が大きく異なるのは、測定時間が約 8 倍異なるためである。また、JLK の実際の Cd 含有量は 0.57ppm であるから、今回の定量値は、誤差の範囲では一致しているものの、約 20% 過小評価されている。従って、測定時間半日程度では、信頼性の高い定量値を得るのには、必ずしも十分ではないと判断された (Cd 含有量 0.5ppm 程度の場合)。

Cd 以外の元素として、C, Ca, Cl, Fe, Mn, Si, Sm, Ti の Gated スペクトルを参考までに示した。いずれの元素もはっきりとしたピークが観測され、信頼性のある定量値が得られるものと思われる。

昨年よりも検出効率が向上したが、信頼性のある定量値を得るために、更なる装置及びソフトウェアの改良が望まれる。今後は、更に実試料について信頼性等を多方面から評価する予定である。

MPGA連携重点研究発表会  
サブグループ2:  
環境試料分析への適応性の検討

2008. 2. 19

東大院 総合文化 松尾 基之

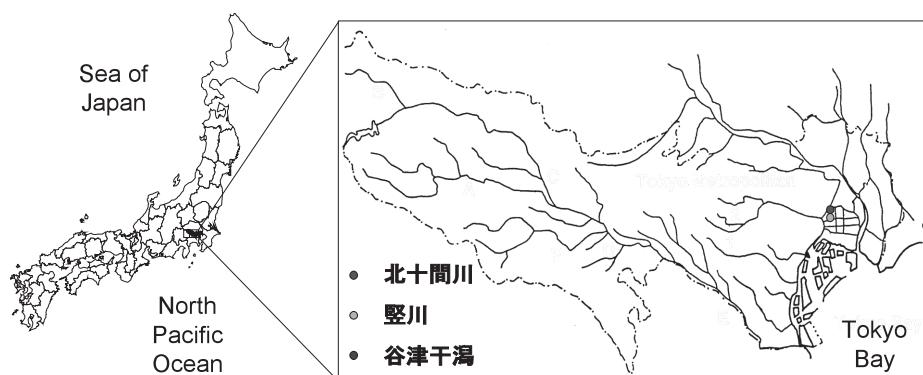
多重ガンマ線検出器を用いた  
即発ガンマ線分析への期待

- 都市河川及び干潟底質中における B, Cd, H, Hg, S, Si 等の元素の高感度分析  
→干潟底質では検出限界以下が多かった
- 高効率化による測定時間の短縮  
→傾向の把握には、多くの試料の測定が必要

## 平成19年度の多重即発ガンマ線分析の実施にあたって

- B, Cd, H, Hg, S, Si 等の元素の高感度分析
  - 実際の環境試料への適用
  - 環境標準試料との比較
- 同時計数測定
- オートサンプルチェンジャーの利用

### 試料採取地点



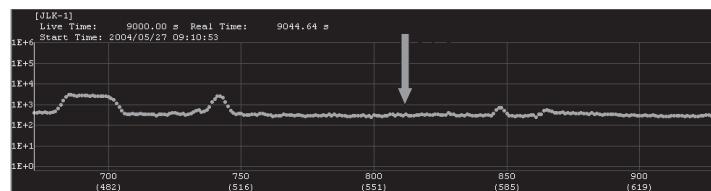
北十間川  
竪川 } 東京都内部河川、人為的環境負荷が高い  
谷津干潟 } ラムサール条約登録地として自然環境が  
保全されている

## 測定に供した環境試料

- ・JLK-1 (琵琶湖 Lake sediment) ---> JLK  
Geological Survey of Japan  
 $Cd = 0.572 \text{ ppm}$
- ・NIES No.2 (三四郎池 Pond sediment) ---> JPS  
National Institute for Environmental Studies  
 $Cd = 0.82 \pm 0.06 \text{ ppm}$
- ・北十間川底質:  $Cd = \text{約 } 6 \text{ ppm}$
- ・谷津干潟底質:  $Cd = \text{約 } 0.6 \text{ ppm}$

## 従来法PGA測定(Thermal 9000s) — Cdビーカー (558keV)

JLK

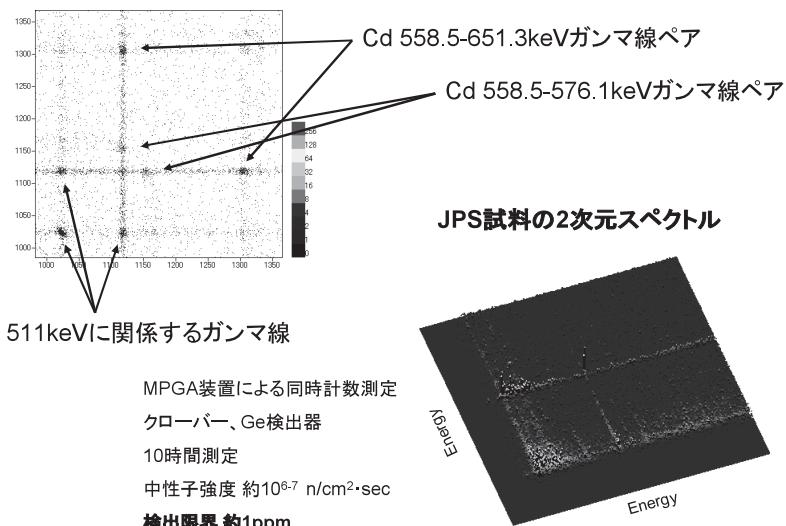


JPS

谷津干潟  
(深層部)

## カドミウム標準試料の同時計数測定

### カドミウム標準試料の2次元スペクトル



## 検出器のセットアップ (H17年度)

中性子ビーム →  
中性子強度  
約 $10^{6.7}$  n/cm<sup>2</sup>・sec

- 検出効率
- ・クローバー 1台 120%  
(4クリスタル)
  - ・16クリスタル合計 480%



クローバー型  
Ge 検出器  
(4台)

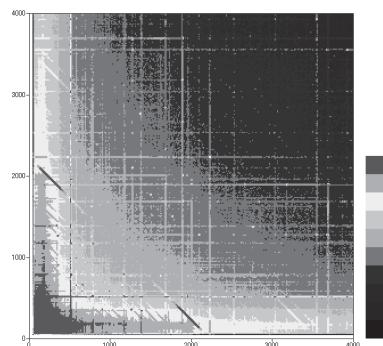
## 検出器のセットアップ(本年度)

- ・クローバー型 Ge 検出器: 8台  
(8 × 4結晶 = 32結晶のうち2結晶  
が故障: 30結晶で測定)
- ・中性子ビーム強度  
約  $10^{6-7}$  n/cm<sup>2</sup> · sec
- ・検出効率  
クローバー 1台 120% (4クリスタル)  
30クリスタル合計 約900%  
(絶対検出効率は、推定約4%)

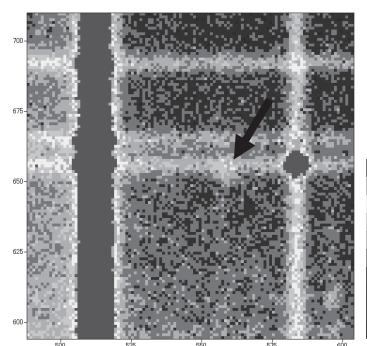
## 環境試料の測定条件

- ・JPS 2007/11/19-20  
測定時間: 63027秒  
試料重量: 約200 mg (Cd 0.16 μg)
- ・JLK 2007/11/15-16  
測定時間: 44124秒  
試料重量: 約200 mg (Cd 0.11 μg)
- ・北十間川 2007/11/16  
測定時間: 30418秒  
試料重量: 210.3 mg (Cd 1.2 μg)
- ・谷津干潟 2007/11/14-15, 16-19  
測定時間: 351667秒  
試料重量: 188.2 mg (Cd 0.12 μg)

## JPSの2次元マトリクス

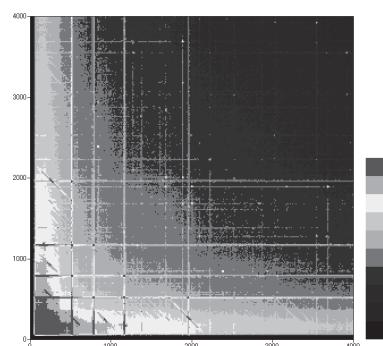


全体図

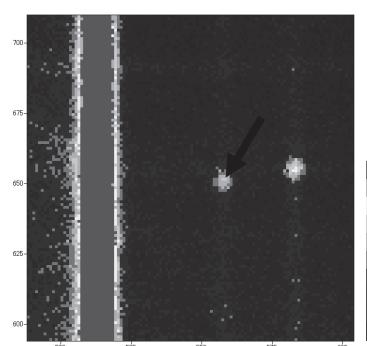


拡大図

## 北十間川の2次元マトリクス

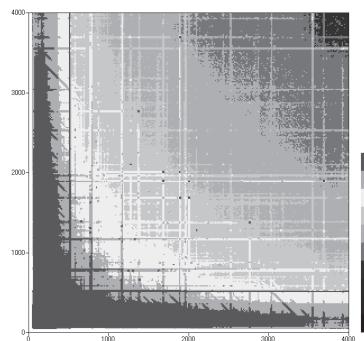


全体図

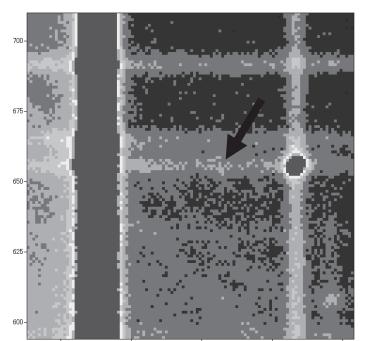


拡大図

## 谷津干潟の2次元マトリクス

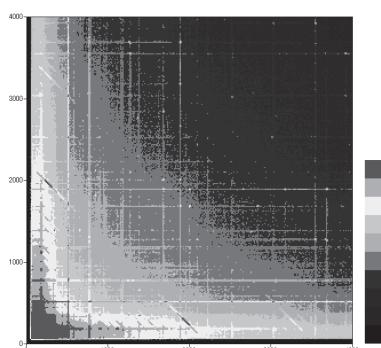


全体図

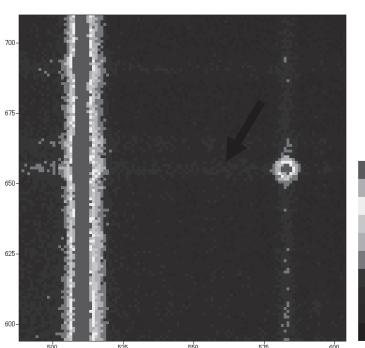


拡大図

## JLKの2次元マトリクス

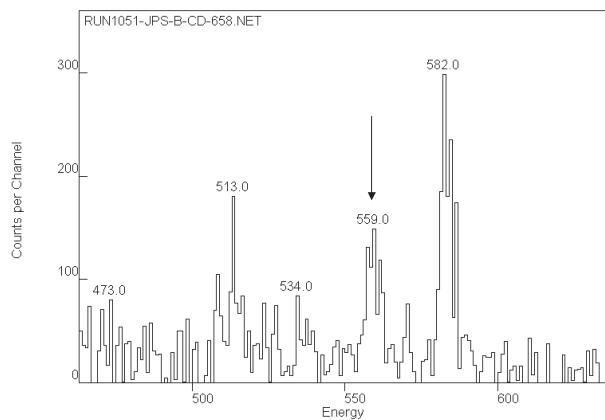


全体図



拡大図

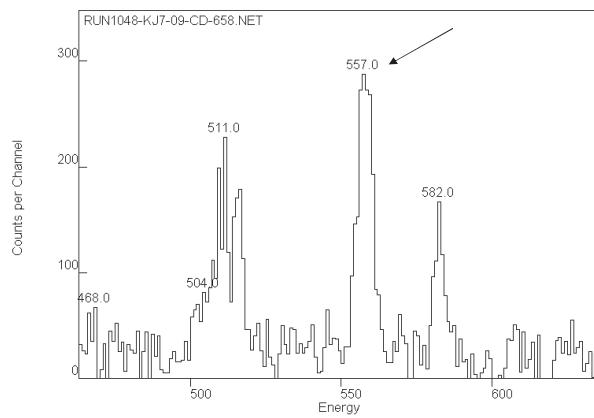
## JPSの Cd ガンマ線ペア (558.5-651.3keV)



射影スペクトル  
(矢印の所がCdのピーク)

645counts = 0.0102 cps  
Cd = 0.82 ppm

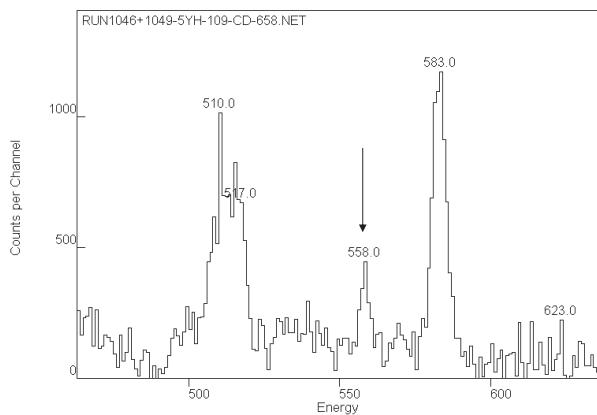
## 北十間川の Cd ガンマ線ペア



射影スペクトル  
(矢印の所がCdのピーク)

1659counts = 0.0545 cps  
JPSを基準とした時の分析値  
Cd定量値  $8.4 \pm 1.6$  ppm

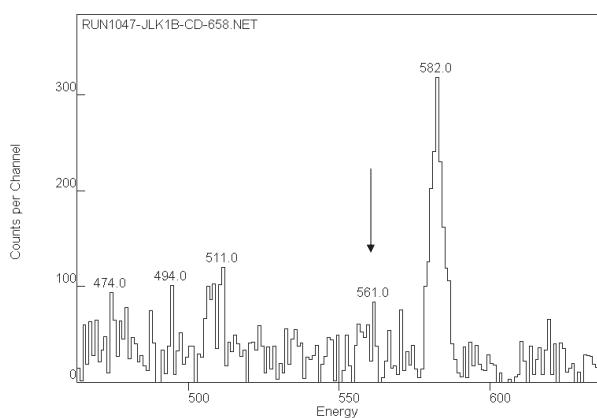
## 谷津干潟の Cd ガンマ線ペア



射影スペクトル  
(矢印の所がCdのピーク)

1225counts = 0.00348 cps  
JPSを基準とした時の分析値  
Cd定量値  $0.46 \pm 0.14$  ppm

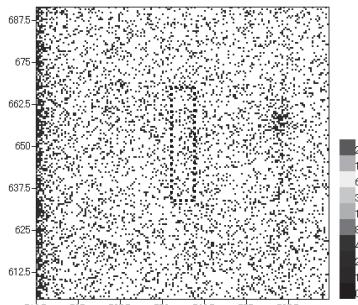
## JLKの Cd ガンマ線ペア



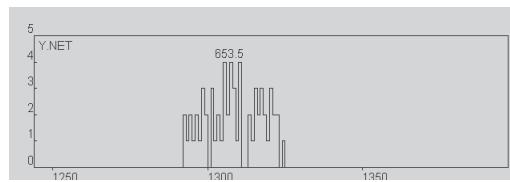
射影スペクトル  
(矢印の所がCdのピーク)

200counts = 0.00453 cps  
JPSを基準とした時の分析値  
Cd定量値  $0.44 \pm 0.23$  ppm

## JPSの Cd ガンマ線ペア(昨年度) (558.5-651.3keV)

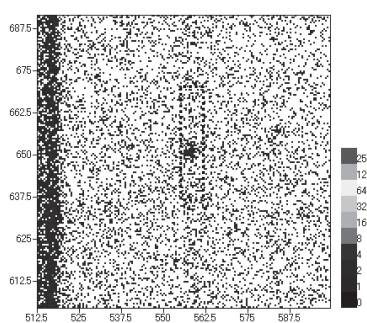


マトリクス  
(ピークは見えない)

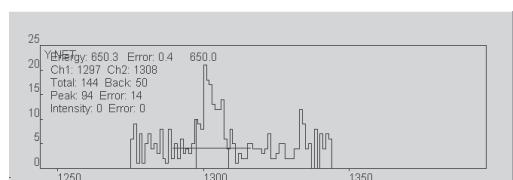


射影スペクトル  
(わずかにピークらしきもの  
が見える?)  
(Cd = 0.82 ppm のはず)

## 北十間川の Cd ガンマ線ペア(昨年度) (558.5-651.3keV)



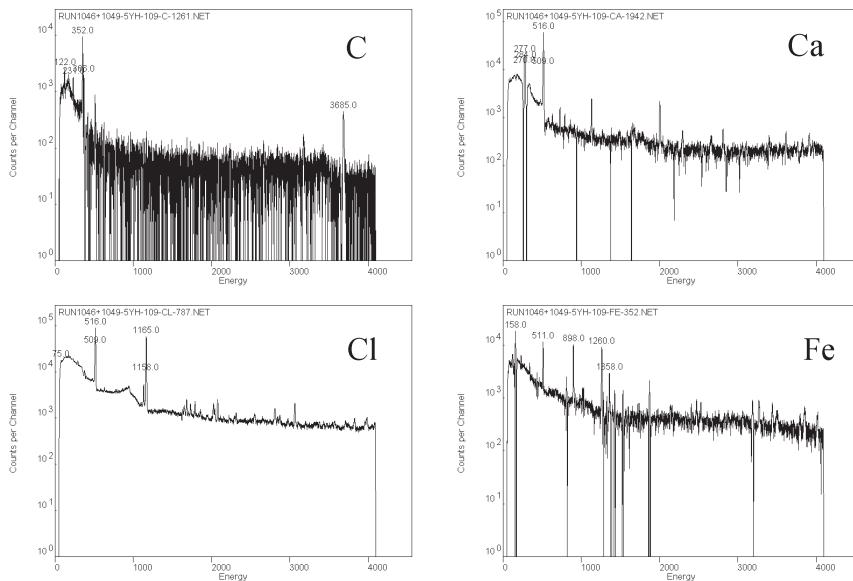
マトリクス



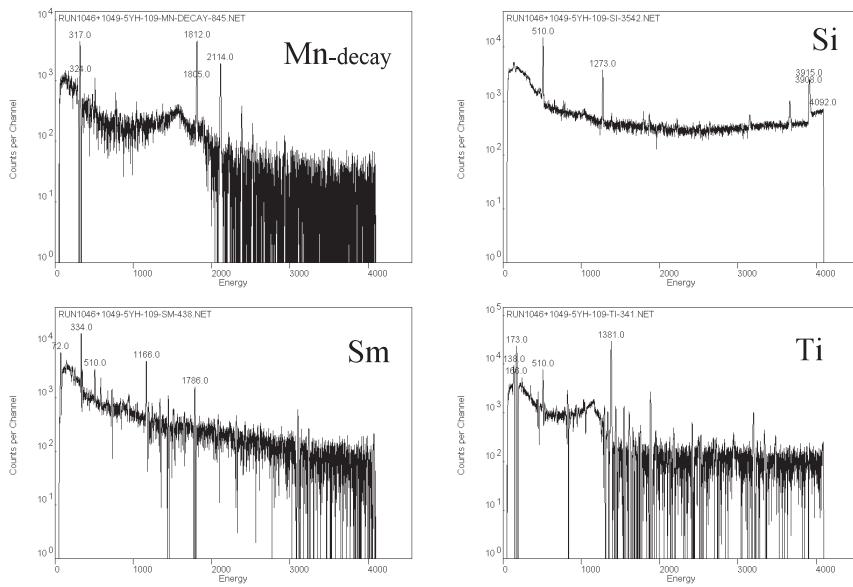
射影スペクトル

• 1297ch～1308ch  
counts  $94 \pm 14$   
Cd定量値  $7.7 \pm 1.1 \text{ ppm}$

## 谷津干潟のその他のGatedスペルトル



## 谷津干潟のその他のGatedスペルトル



#### 4. 多重即発 $\gamma$ 線分析による高炉スラグ中 Cd の定量

#### Determination of Cadmium in blast furnace slag by Multiple Prompt Gamma-ray Analysis

伊下信也, 平井昭司, 鈴木章悟, 岡田往子

武藏工業大学大学院 工学研究科

〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1

Shunya INOSHITA, Shoji HIRAI, Shogo SUZUKI, Yukiko OKADA

Graduate school of Engineering, Musashi Institute of Technology

1-28-1 Tamazutumi, Setagaya-ku, Tokyo, Japan

Since blast furnace slag is used widely (cement, concrete aggregate and so on), it is important to measure toxic heavy metal in slag. In this study, we measured Cd in blast furnace slag by Multiple Prompt Gamma-ray Analysis (MPGA) and investigated LLD (Lower Limit of Determination). As a result, LLD for Cd in slag was 1ppm order (counting time: 3h). In each sample, Cd peak was not confirmed in this measurement.

Keywords: blast furnace slag, Cd, Multiple Prompt Gamma-ray Analysis (MPGA), lower limit of determination

#### 1.はじめに

我が国では年間約1憶トンの鉄鋼が生産されており、その副産物としてスラグが生成する。スラグとは、金属精錬の際に生じる金属以外の滓であり、鉄の場合は銑鉄1トンあたり約300kgのスラグが生成される。多量に生成するスラグは、コンクリート用骨材やセメント原料、道路路盤材などに使用されている。その一方で、スラグ中に含まれる重金属に関して公表されているデータがなく、重金属を含むスラグが再利用された場合、重金属が環境中へ溶出する恐れがある。そこで、本研究ではCdを高感度に分析ができる多重即発 $\gamma$ 線分析(MPGA)により高炉スラグを分析し、スラグ試料に対してのCd定量下限値の調査をすることとした。

#### 2.実験

##### 2-1.分析試料

分析試料は、日本鉄鋼連盟製の高炉スラグ標準物質JSS902-1, JSS903-1, JSS904-1と高純度鉄標準物質JSS001-4である。また、Cd標準溶液(1000ppm)を50~1000 $\mu$ l浸み込ませたろ紙(縦2cm×横2cm)を標準試料として用いた。スラグと高純度鉄は約100mgをFEPフィルムで封入した。ろ紙も同様にFEPフィルムで封入し、測定試料とした。

## 2-2.測定条件

多重即発 $\gamma$ 線分析は、日本原子力研究開発機構が所有する研究用原子炉 JRR-3M の C2-3-2 ビームライン上に設置された多重即発 $\gamma$ 線分析装置 STELLA を利用した。測定の際にはパイルアップを低減させるために、アッテネータ 2mm を挿入した。32 個ある Ge 結晶のうち 29 結晶が稼働していた。測定は、JSS904-1 とろ紙を重ねた状態、JSS001-4 とろ紙を重ねた状態、高炉スラグのみ、高純度鉄のみ、ブランクという手順で行った。Cd の滴下量に応じて測定時間を変え、10 分～3 時間測定を行った。不感時間を補正するために、ビームラインの上方に<sup>133</sup>Ba を設置し、試料と一緒に測定を行っている。測定モードは、すべての試料においてシングルモードを選択した。Cd 分析の際は<sup>113</sup>Cd(n,  $\gamma$ )反応で生成する<sup>114</sup>Cd の即発 $\gamma$ 線 651.3keV(18.9%)-558.5keV(100%)に注目した。不感時間は、<sup>133</sup>Ba の崩壊 $\gamma$ 線 356keV(62.1%)-81.0keV(34.1%)のほかに、<sup>48</sup>Ti(n,  $\gamma$ )で生成する<sup>49</sup>Ti からの 341.7 keV(29.0%)-1382keV(100%)、<sup>56</sup>Fe(n,  $\gamma$ )で生成する<sup>57</sup>Fe からの 1019keV(6.0%)-692.0keV(16.4%)に注目して補正を行った。

## 3.実験結果

Fig.1 に Cd 溶液を滴下したろ紙とスラグを重ねて測定した時の計数率変化を示す。不感時間は、<sup>133</sup>Ba を用いて補正している。

Cd の滴下量と計数率には、良好な直線関係が得られた。また、測定時間が 10 分程度と短時間の場合は、内標準として注目していた核種の $\gamma$ 線ピークが確認できない場合があった。なお、不感時間の補正を行わなかった場合は、 $R^2=0.95$  であった。このことから、MPGA においても<sup>133</sup>Ba による不感時間の補正が有効であることが確認できた。

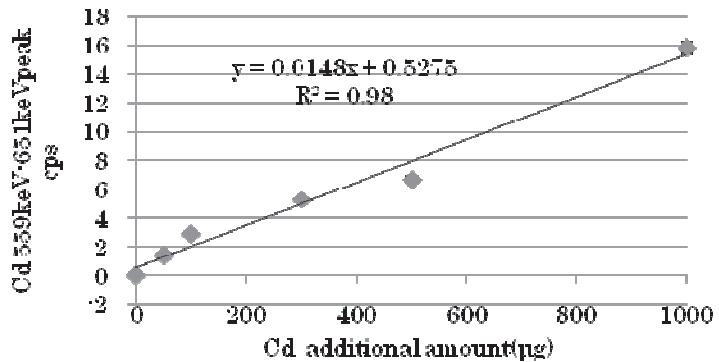


Fig.1 The change of count rate and Cd additional amount  
(Result when JSS904-1 superposed on filter paper)

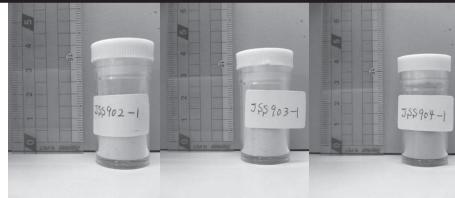
Table1 Counts and LLD value in this work

	Counting time(s)	Count rate(cps)	Cd LLD(ppm)
JSS001-4	10130	-9.2×10 <sup>-3</sup> ±5.6×10 <sup>-3</sup>	3.6
JSS902-1	10505	-5.0×10 <sup>-3</sup> ±5.6×10 <sup>-3</sup>	3.8
JSS903-1	9620	-4.9×10 <sup>-3</sup> ±5.9×10 <sup>-3</sup>	3.3
JSS904-1	9159	-1.1×10 <sup>-2</sup> ±5.8×10 <sup>-3</sup>	1.8

Table1 にスラグと高純度鉄の計数値並びに検出下限値を示す。検出下限値は、 $3\sqrt{BG}$  で算出し 3 時間測定に換算した値を示している。スラグ、高純度鉄とともにバックグラウンドの方がグロスカウントより大きくなつたため、計数率はマイナスとなり Cd のピークは確認されなかつた。また、測定の結果から定量下限値は、1ppm オーダーであることが確認できた。なお、今回の測定は、シングルモードで行つて不感時間が大きくなつてゐる。同時計数事象のみ記録する $\gamma$ - $\gamma$ モードにて測定することで、数倍の LLD 改善が期待できる。

サブグループ4

金属材料物資等への適応性の検討



## 多重即発γ線分析による 高炉スラグ中Cdの定量

Determination of Cadmium in blast furnace slag by Multiple Prompt Gamma-ray Analysis

武藏工業大学

伊下信也, 平井昭司, 鈴木章悟, 岡田往子

Musashi Institute of Technology

Shunya INOSHITA, Shoji HIRAI, Shogo SUZUKI, Yukiko OKADA

1

### 1. 目的

- 高炉スラグ
  - 製鉄の副産物の利用
  - コンクリート
  - 路盤材
- スラグ中の有害金属(Cd, Se · ·)
  - 公表されていない
  - 溶出実験 検出限界以下
- 多重即発γ線分析 (MPGA: Multiple Prompt Gamma-ray Analysis)
  - JRR-3 C2-3-2 ピームライン
  - 多重即発γ線分析装置 STELLA
  - 現在、クローバー検出器8台(32結晶)
- Cdの分析
- 定量下限値の調査



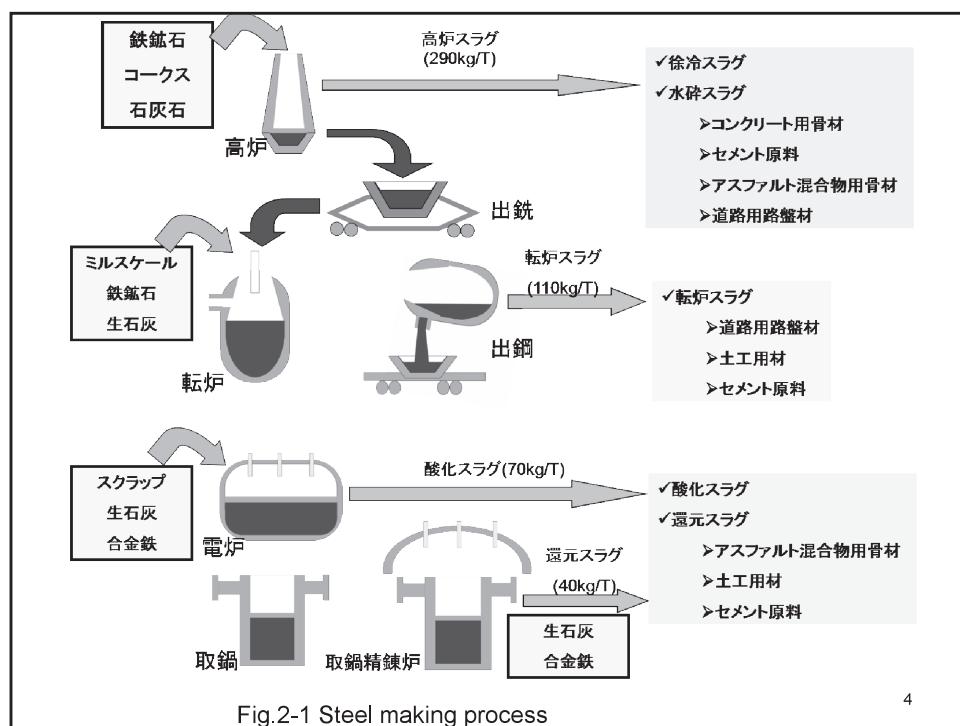
Phot.1 Blast furnace Slag

2

## 2.スラグ生産量(平成15年度実績)

- ・ 銑鉄生産量  $8.3 \times 10^7\text{t}$  (8300万t)
- ・ スラグ生産量  $2.4 \times 10^7\text{t}$  (2400万t)
  - 徐冷スラグ  $6.0 \times 10^6\text{t}$  (600万t)
  - 水碎スラグ  $1.8 \times 10^7\text{t}$  (1800万t)
- ・ スラグ生産原単位 286kg/銑鉄t
- ・ 水碎率 75.2%

3



4

## スラグ使用内訳(平成15年度実績)

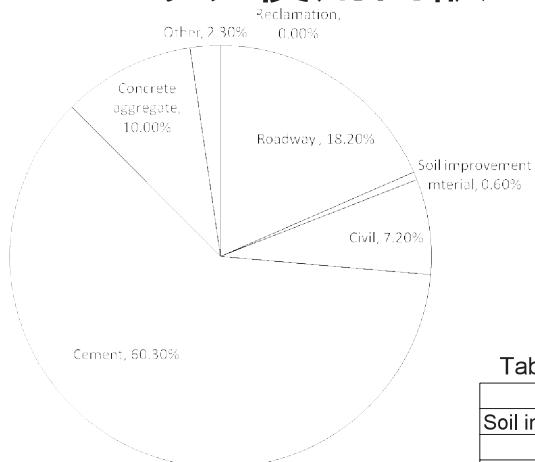


Fig.2-2 Use breakdown of slag

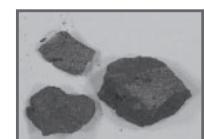
Table 2-1 Use breakdown of slag

Roadway	18.20%
Soil improvement material	0.60%
Civil	7.20%
Cement	60.30%
Concrete aggregate	10.00%
Other	2.30%
Reclamation	0.00%

5

Table 2-2 Certified and reference value of Iron ore standard materials

SISHEN HEMATITE		PHALABORWA MAGNETITE	
Iron ore SARM11		Iron ore SARM12	
	%		%
Al	0.73	Al	0.41
Fe	66.1	Ca	0.78
K	0.12	Fe	66.6
Si	1.45		ppm
	ppm	Mg	1.69
As	19	Mn	0.17
Ca	323	Si	0.16
Cd	3	Ti	0.43
Cr	41	Co	223
Cu	11	Cr	21
Mg	124	Cu	502
Mn	113	K	108
Na	113	Na	91
Ni	30	Ni	281
P	419	P	477
Pb	18	Pb	25
S	118	S	695
Ti	382	V	520
V	40	Zn	142
Zn	23	Reference value	ppm
Reference value	ppm	As	2
Co	27	Cd	5



(a)



(b)



(c)

Phot.2-1 Iron ore  
 (a) Magnetite  
 (b) Limonite  
 (c) Specularite

6

## 標準物質の組成

Table2-3 Certified and reference value of JSS001-4(Pure iron)\*  
(Analytical result of ICP-MS)

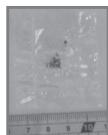
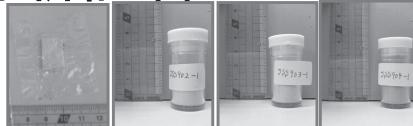
Elements	Certified value	Analytical results(ppm)			
		Normal plasma		Cold plasma	
		Mean	$\sigma$	Mean	$\sigma$
Be		<0.01	----	<0.01	----
Mg		0.21	0.032	0.14	0.171
Al		<0.39	----	<0.45	----
Ca				0.2	0.05
Ti		0.11	0.09		
V		0.05	0.013		
Mn		0.02	0.01	0.02	0.01
Co	0.3	0.30	0.027	0.33	0.045
Ni	<0.3	0.12	0.052	0.17	0.055
Cu	0.6	0.57	0.042	0.58	0.018
Zn	6.8	6.3	0.72	5.9	0.18
Se		<0.78	----	<0.86	----
Y		<0.01	----		
Zr		<0.01	----	<0.01	----
Nb		0.0067	0.0016		
Mo	<0.3	0.018	0.002		
Cd		<0.01	----		
In		<0.01	----	<0.01	----
Sn	<0.4	0.10	0.013	0.12	0.04
Ba		<0.01	----	<0.01	----
La		<0.01	----		
Ce		<0.01	----		
Hf		<0.01	----		
Ta		<0.01	----		
W	0.3	0.32	0.032		
Pb	0.2	0.18	0.028	0.13	0.011

\* Kyoko FUJIMOTO and Makoto SHIMURA, BUNSEKI KAGAKU, 50, 175-182(2001)

7

## 3-1. 分析試料

- 高炉スラグ標準物質
  - JSS902-1, 903-1, 904-1
  - 100mg程度
- 高純度鉄標準物質
  - JSS001-4
  - 100mg程度
- Cd標準溶液を浸みこませたろ紙
  - Cd 1000  $\mu$ g, 500  $\mu$ g, 300  $\mu$ g, 100  $\mu$ g, 50  $\mu$ g相当
  - 2cm × 2cm



- (褐色森林土壤 JSAC0401)
  - Cd 4.25 ± 0.41 ppm

たまたま、持ち合わせていたため測定した。



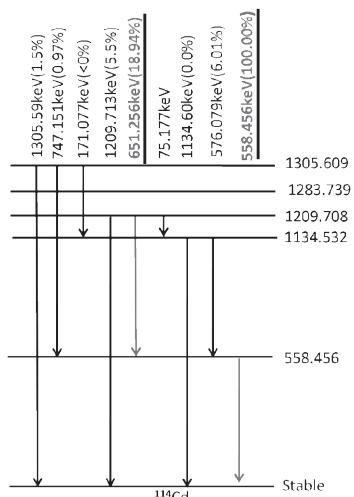
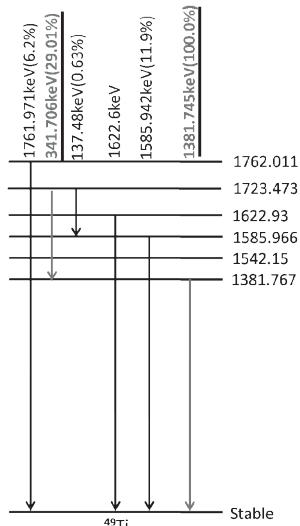
8

## 3-1. 分析試料

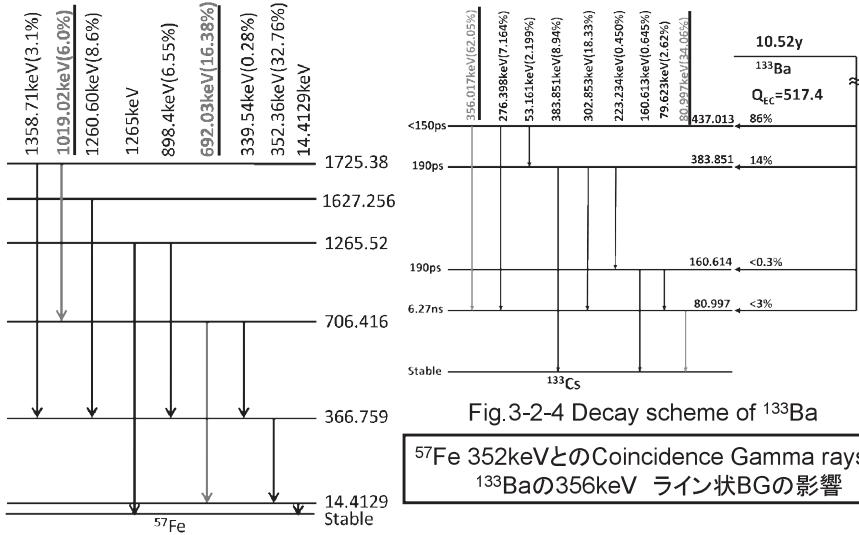
Table 3-1-1 Sample weight

Sample	Weight (mg)
JSS001-4 (Pure iron)	114.2
JSS902-1 (Blast furnace slag)	105.1
JSS903-1 (Blast furnace slag)	128.1
JSS904-1 (Blast furnace slag)	128.1
(JSAC0401 (Brown forest soil))	162.7

## 3-2. 注目核種

Fig. 3-2-1 Level scheme of  $^{114}\text{Cd}$   
 $^{113}\text{Cd}$  20650bFig. 3-2-2 Level scheme of  $^{49}\text{Ti}$   
 $^{48}\text{Ti}$  7.84b

### 3-2. 注目核種

Fig.3-2-3 Level scheme of  $^{57}\text{Fe}$  $^{56}\text{Fe}$  2.59b

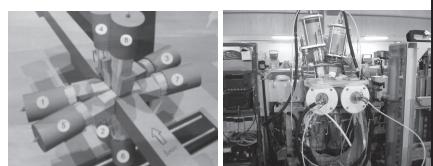
11

Fig.3-2-4 Decay scheme of  $^{133}\text{Ba}$ 

57Fe 352keVとのCoincidence Gamma raysは、  
 $^{133}\text{Ba}$ の356keV ライン状BGの影響

### 4. 実験方法

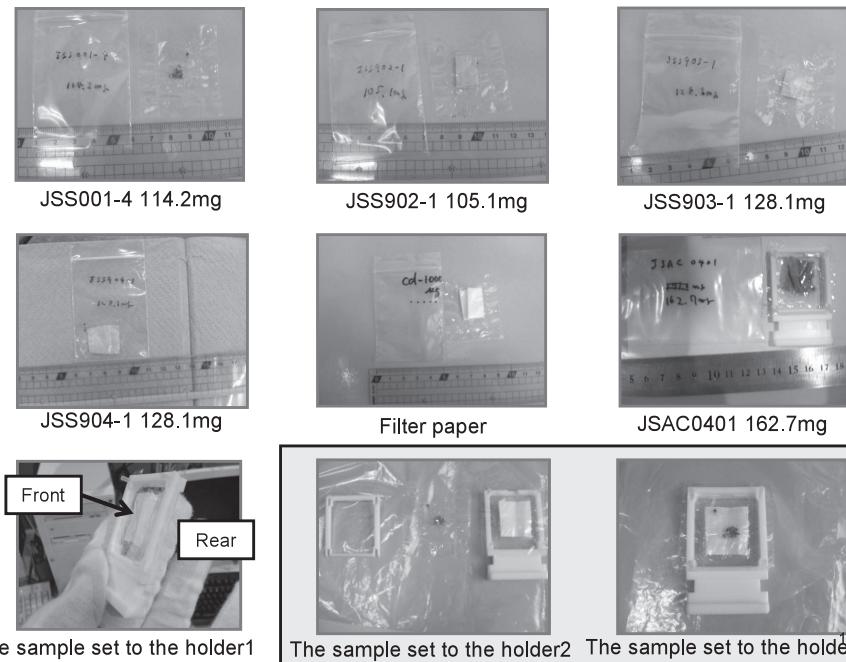
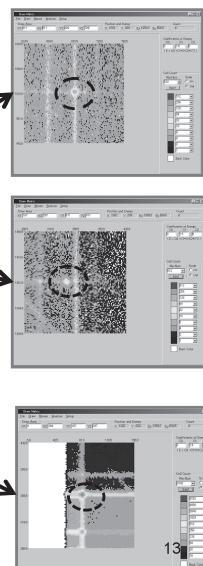
- 測定手順
  - 高炉スラグ、高純度鉄とろ紙を重ねた状態
  - 高炉スラグのみ
  - 高純度鉄のみ
  - Blank(ろ紙)のみ
- $^{133}\text{Ba}$ 線源 同時測定
- アッテネータ 2mm
- JRR-3M C2-3-2ビームライン設置の多重即発  
 $\gamma$ 線分析装置STELLAにて測定
  - Single mode
  - Detector 14, 17, 21は稼働せず

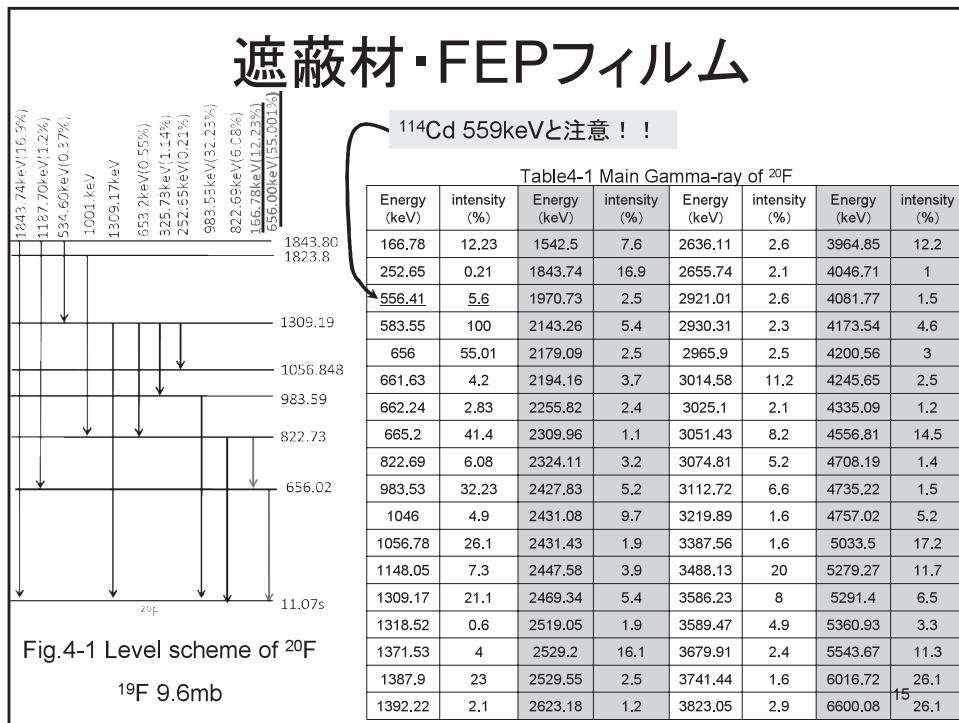


12

## 4. 実験方法

- 不感時間の補正
  - 内標準で見積もる
    - 高純度鉄  $^{57}\text{Fe}$ (692keV-1019keV)
    - 高炉スラグ  $^{49}\text{Ti}$ (342keV-1382keV)
  - $^{133}\text{Ba}$  timerを使用する
    - $^{133}\text{Ba}$ (356keV-81.0keV)

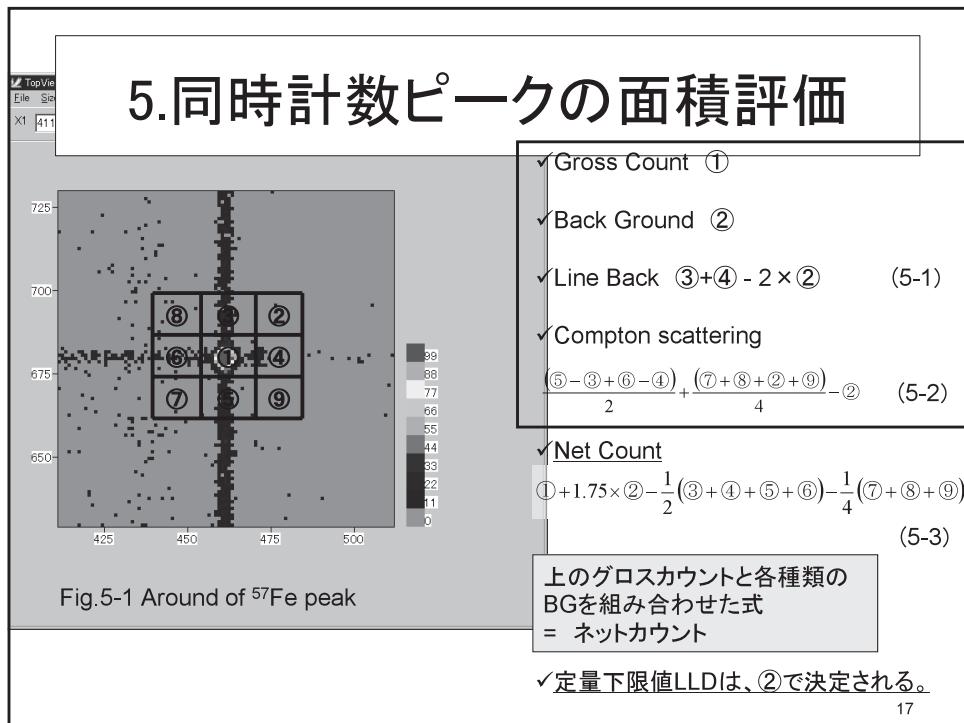




## 4. 実験方法

Table4-2 Running time in each sample

		Running time (s)		Running time (s)	
1	JSS001-4 + Cd 1000 $\mu\text{g}$	419	11	JSS001-4	10130
2	JSS001-4 + Cd 500 $\mu\text{g}$	1232	12	JSS902-1	10505
3	JSS001-4 + Cd 300 $\mu\text{g}$	1590	13	JSS903-1	9620
4	JSS001-4 + Cd 100 $\mu\text{g}$	3060	14	JSS904-1	9159
5	JSS001-4 + Cd 50 $\mu\text{g}$	7074	15	JSAC0401	3472
			16	Blank	2864
6	JSS904-1 + Cd 1000 $\mu\text{g}$	1114			
7	JSS904-1 + Cd 500 $\mu\text{g}$	1350			
8	JSS904-1 + Cd 300 $\mu\text{g}$	1521			
9	JSS904-1 + Cd 100 $\mu\text{g}$	3333			
10	JSS904-1 + Cd 50 $\mu\text{g}$	6717			



## 6. 実験結果

## 6-1. 実験結果(計数値)

Table6-1-1 Counts in each measurement (Pure iron)

	<sup>133</sup> Ba			<sup>114</sup> Cd			<sup>57</sup> Fe		
	Gross	Net	BG(upper right)	Gross	Net	BG(upper right)	Gross	Net	BG(upper right)
JSS001-4 + Cd 1000 $\mu\text{g}$ (419s)	15705	5548 $\pm$ 161	6261	6067	3602 $\pm$ 95	576	422	-13 $\pm$ 29	2547
JSS001-4 + Cd 500 $\mu\text{g}$ (1232s)	47130	20160 $\pm$ 272	13474	12281	6513 $\pm$ 134	997	955	200 $\pm$ 41	447
JSS001-4 + Cd 300 $\mu\text{g}$ (1590s)	64804	33510 $\pm$ 310	11702	9001	4781 $\pm$ 115	814	1205	703 $\pm$ 41	378
JSS001-4 + Cd 100 $\mu\text{g}$ (3060s)	112019	5009 $\pm$ 417	15471	7932	4153 $\pm$ 108	936	2020	1227 $\pm$ 53	386
JSS001-4 + Cd 50 $\mu\text{g}$ (7074s)	298729	164433 $\pm$ 658	29900	11987	6112 $\pm$ 134	1767	5208	3637 $\pm$ 82	1571
JSS001-4 (10130s)	403737	201878 $\pm$ 778	30107	1402	-93 $\pm$ 54	1148	6170	4605 $\pm$ 88	517
19									

## 6-1. 実験結果(計数値)

Table6-1-2 Counts in each measurement (Slag)

	<sup>133</sup> Ba			<sup>114</sup> Cd			<sup>49</sup> Ti		
	Gross	Net	BG(upper right)	Gross	Net	BG(upper right)	Gross	Net	BG(upper right)
JSS904-1 + Cd 1000 $\mu\text{g}$ (1114s)	42351	17294 $\pm$ 260	17412	17363	8385 $\pm$ 162	1461	2238	-231 $\pm$ 69	1667
JSS904-1 + Cd 500 $\mu\text{g}$ (1350s)	48240	32271 $\pm$ 253	13243	12507	6615 $\pm$ 136	1118	1636	-168 $\pm$ 59	1227
JSS904-1 + Cd 300 $\mu\text{g}$ (1521s)	63196	31796 $\pm$ 308	10867	9395	5170 $\pm$ 117	822	1484	-26 $\pm$ 55	888
JSS904-1 + Cd 100 $\mu\text{g}$ (3333s)	123356	59492 $\pm$ 433	16306	9812	5350 $\pm$ 119	1113	2556	200 $\pm$ 70	1181
JSS904-1 + Cd 50 $\mu\text{g}$ (6717s)	277006	144479 $\pm$ 640	27235	11611	6204 $\pm$ 130	1785	4604	595 $\pm$ 93	2261
JSS904-1 (9159s)	405560	219797 $\pm$ 769	22568	1337	-105 $\pm$ 53	1214	50140	1461 $\pm$ 93	1146
								20	

## 6-1. 実験結果(計数値)

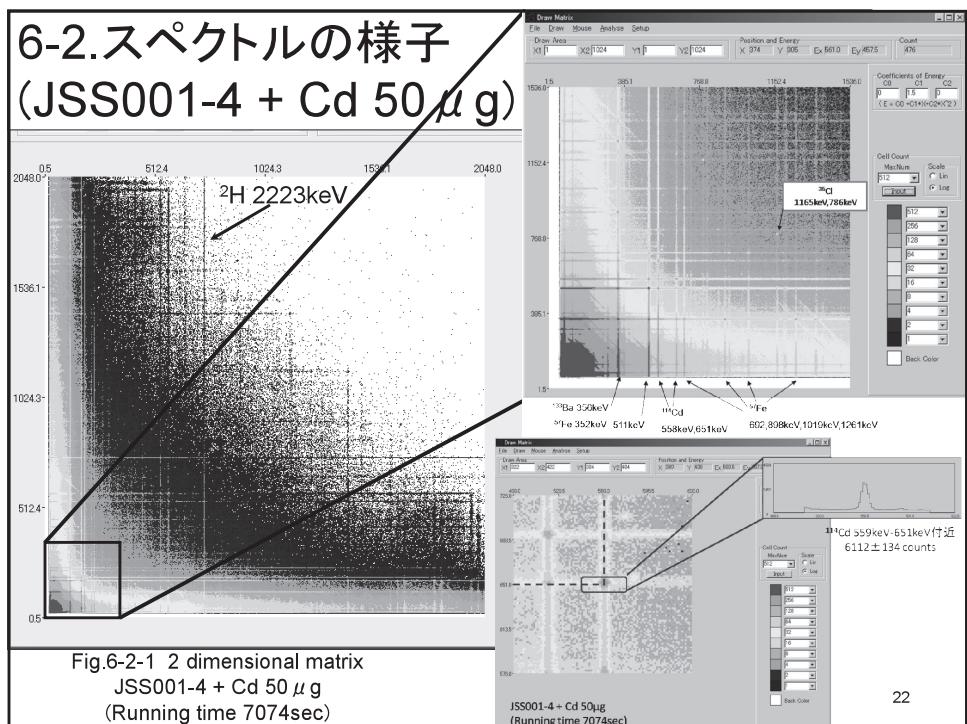
Table6-1-3 Counts in each measurement  
(slag and brown forest soil)

	<sup>133</sup> Ba			<sup>114</sup> Cd			<sup>48</sup> Ti		
	Gross	Net	BG(upper right)	Gross	Net	BG (upper right)	Gross	Net	BG (upper right)
JSS902-1 (10505s)	503655	309386±835	23575	1695	-53±48	1530	4750	877±93	1288
JSS903-1 (9620s)	446536	246402±804	22162	1566	-47±56	1373	6712	3279 ±101	1623
JSAC0401 (3472s)	169860	107997±481	6690	537	53 ±32	328	1766	878±52	465
Blank (2864s)	138713	93311±429	3586	236	2 ±22	177	352	-149±29	186

Table6-1-4 Counts in each measurement  
(brown forest soil and blank )

	<sup>133</sup> Ba			<sup>114</sup> Cd			<sup>57</sup> Fe		
	Gross	Net	BG (upper right)	Gross	Net	BG (upper right)	Gross	Net	BG (upper right)
JSAC0401 (3472s)	169860	107997±481	6690	537	53±32	328	290	65±23	174
Blank (2864s)	138713	93311±429	3586	236	2 ±22	177	68	-22±13	21 <sub>76</sub>

## 6-2.スペクトルの様子 (JSS001-4 + Cd 50 μg)



## Single spectrum(JSS001-4+Cd 50 $\mu$ g)

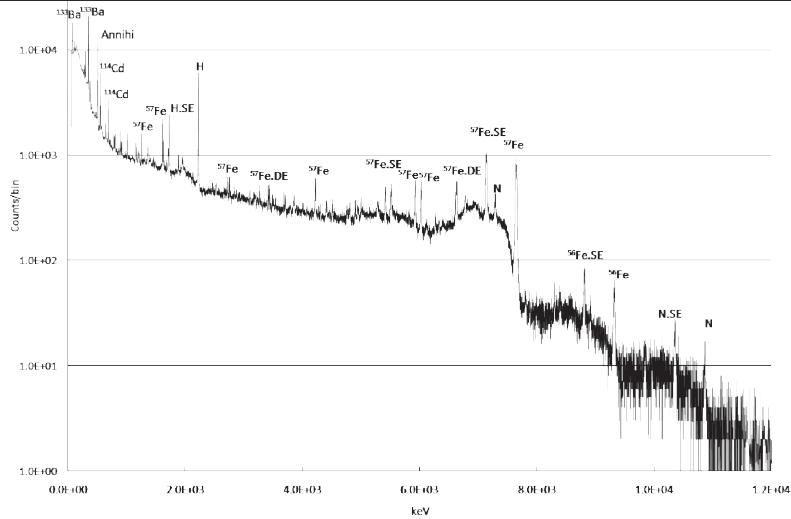
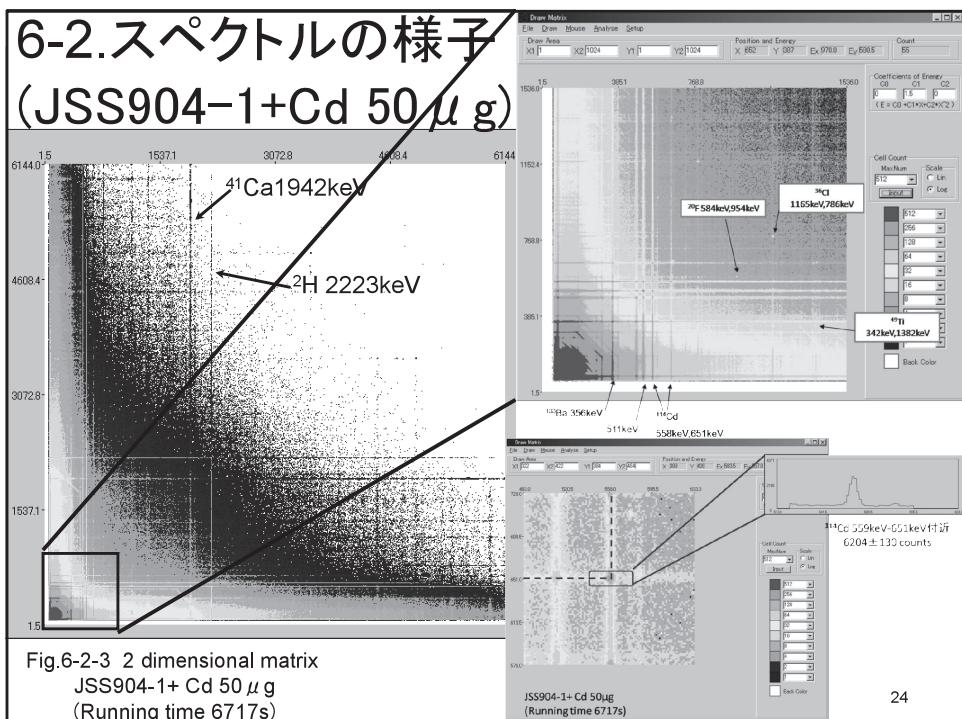


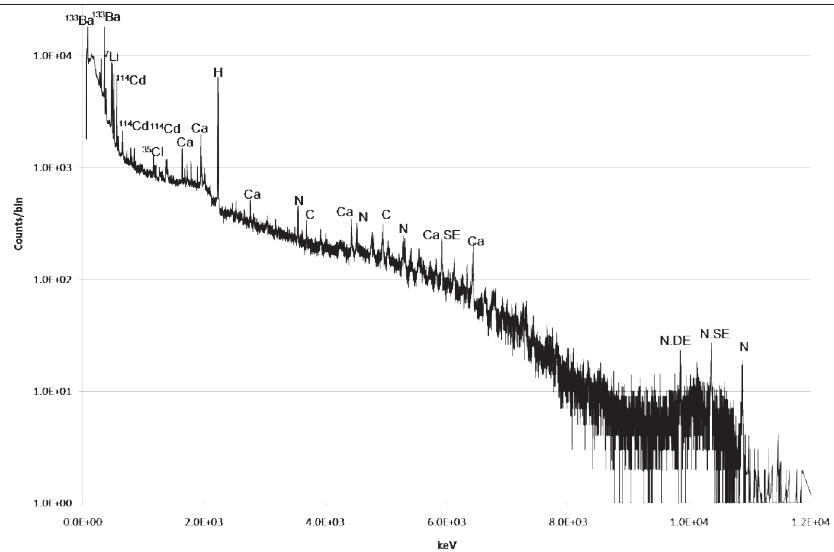
Fig.6-2-2 Single spectrum  
JSS001-4 + Cd 50  $\mu$  g(Running time 7074sec)

23

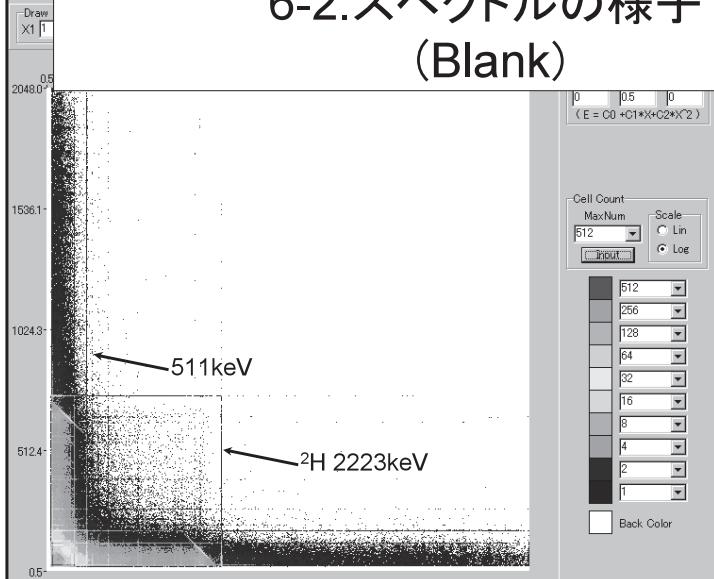
## 6-2.スペクトルの様子 (JSS904-1+Cd 50 $\mu$ g)

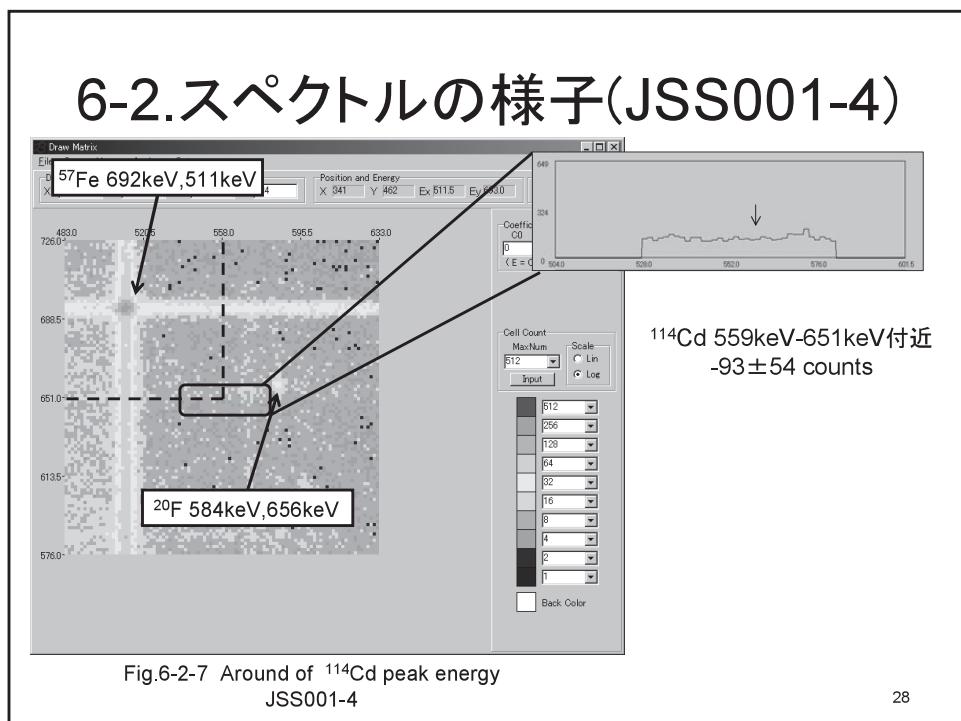
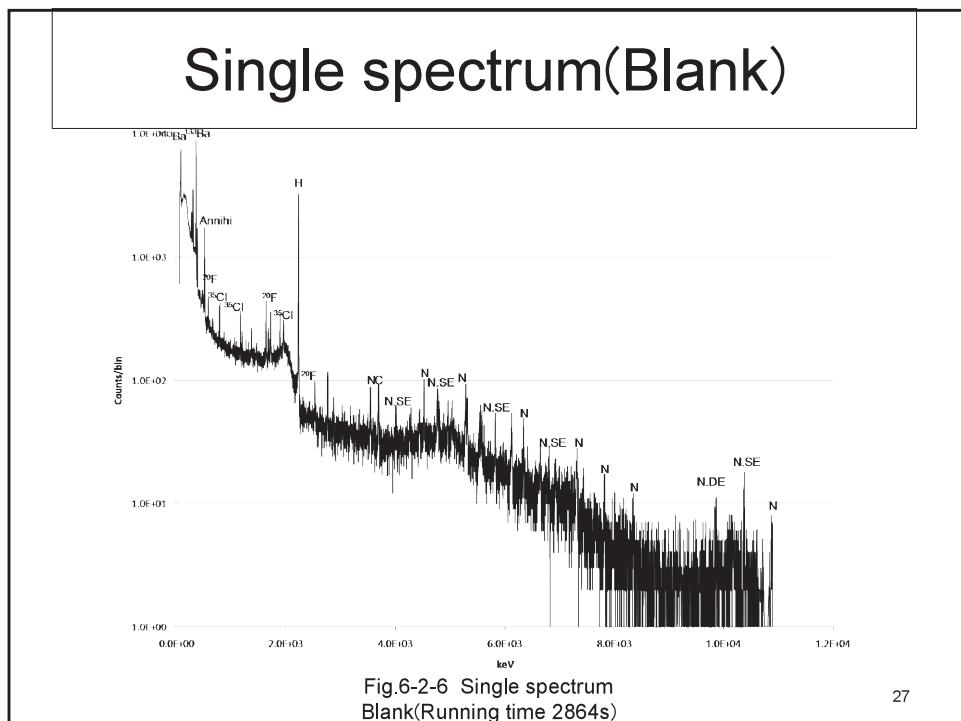


## Single spectrum(JSS904-1+Cd50 μg)

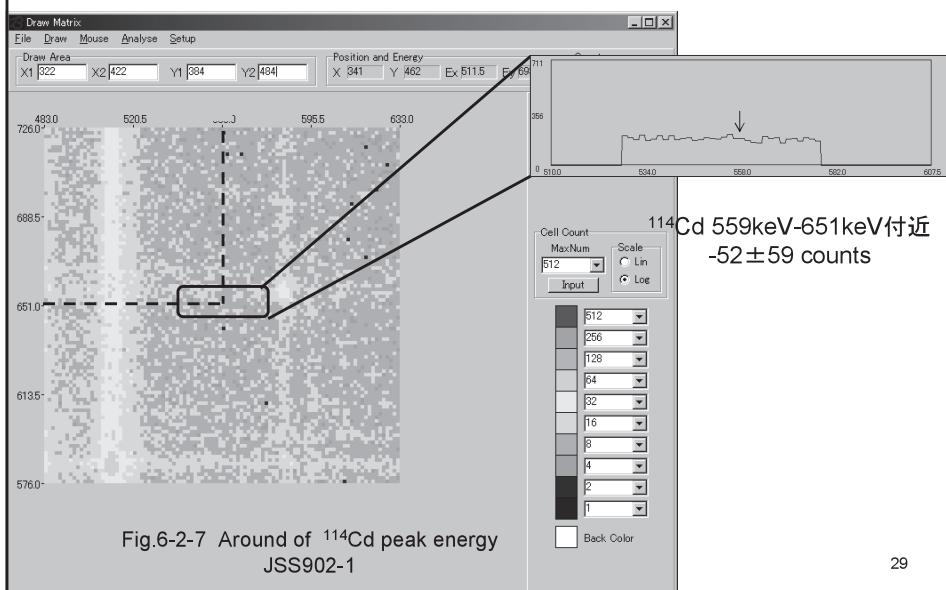


## 6-2.スペクトルの様子 (Blank)

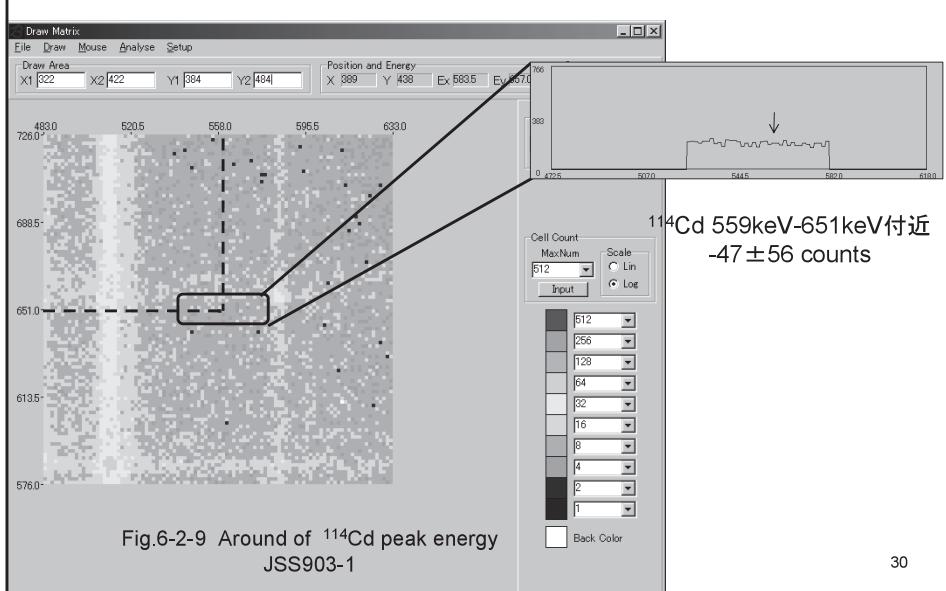




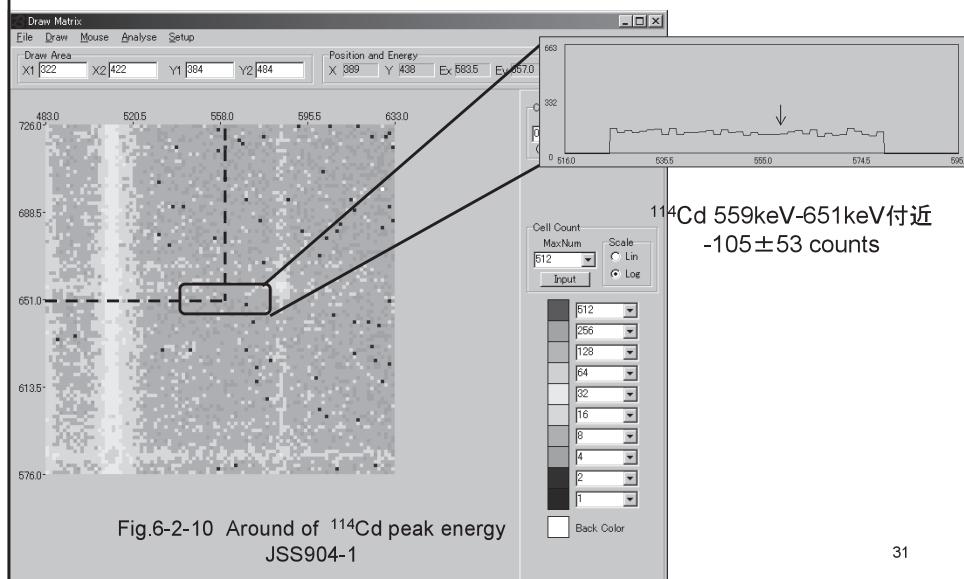
## 6-2.スペクトルの様子(JSS902-1)



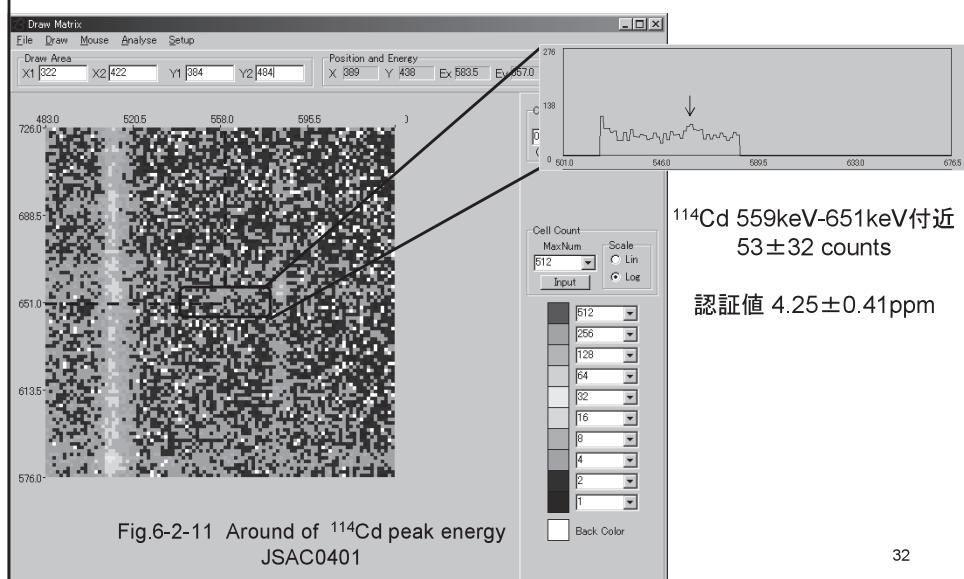
## 6-2.スペクトルの様子(JSS903-1)



## 6-2.スペクトルの様子(JSS904-1)



## 6-2.スペクトルの様子(JSAC0401)



## JSS001-4+Cdを浸みこませたろ紙 (不感時間補正なし)

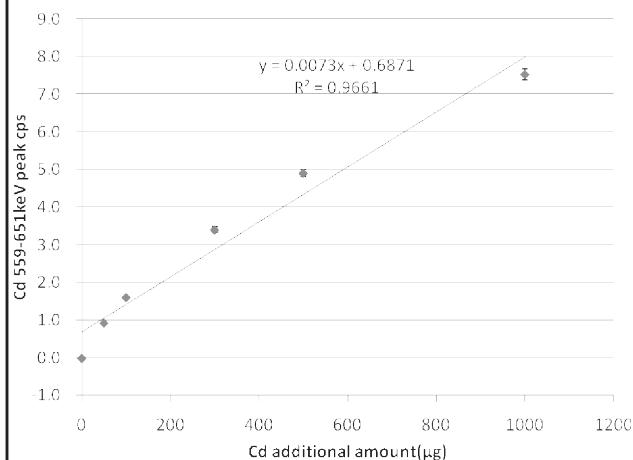


Table.6-3-1 Count rate for JSS001-4 + Cd standard  
Dead time was not corrected.

Additional amount ( $\mu\text{g}$ )	cps
1000	$7.5 \pm 0.15$
500	$4.9 \pm 0.10$
300	$3.4 \pm 0.077$
100	$1.6 \pm 0.036$
50	$0.92 \pm 0.019$
0	$-0.011 \pm 0.0058$

Fig.6-3-1 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was not corrected.)  
(Result when JSS001-4 superposed on filter paper)

33

## JSS904-1+Cdを浸みこませたろ紙 (不感時間補正なし)

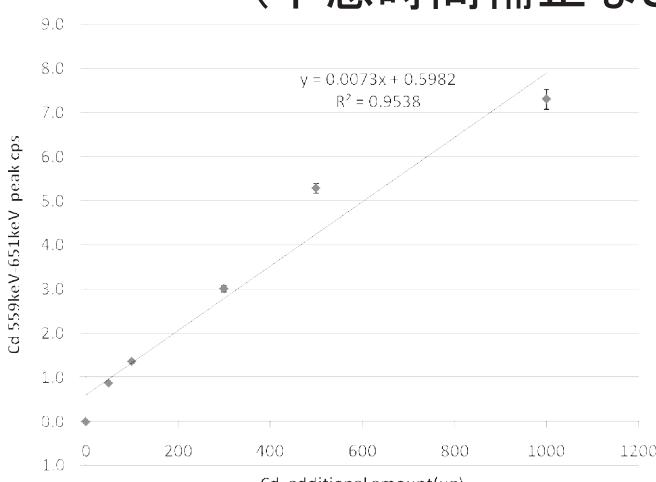


Table.6-3-2 count rate for JSS904-1 + Cd standard  
Dead time was not corrected.

Additional amount ( $\mu\text{g}$ )	cps
1000	$7.3 \pm 0.23$
500	$5.3 \pm 0.11$
300	$3.0 \pm 0.072$
100	$1.4 \pm 0.035$
50	$0.86 \pm 0.019$
0	$-0.0092 \pm 0.0053$

Fig.6-3-2 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was not corrected.)  
(Result when JSS904-1 superposed on filter paper)

34

## 133Baによる不感時間補正

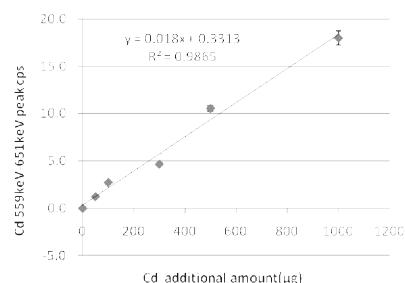


Fig.6-3-3 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was corrected by  $^{133}\text{Ba}$ .)  
(Result when JSS001-4 superposed on filter paper)

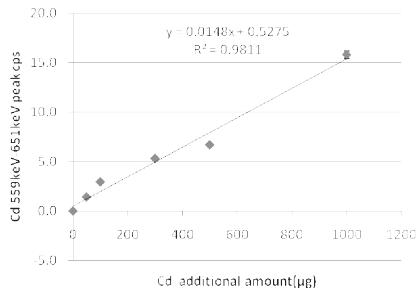


Fig.6-3-4 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was corrected by  $^{133}\text{Ba}$ .)  
(Result when JSS904-1 superposed on filter paper)

Table.6-3-3 count rate for JSS001-4 + Cd standard  
Dead time was corrected by  $^{133}\text{Ba}$ .

Additional amount (μg)	cps
1000	$18 \pm 0.77$
500	$11 \pm 0.26$
300	$4.6 \pm 0.12$
100	$2.7 \pm 0.075$
50	$1.2 \pm 0.027$
0	$-0.015 \pm -0.0087$

Table.6-3-4 count rate for JSS904-1 + Cd standard  
Dead time was corrected by  $^{133}\text{Ba}$ .

Additional amount (μg)	cps
1000	$16 \pm 0.39$
500	$6.7 \pm 0.17$
300	$5.3 \pm 0.13$
100	$2.9 \pm 0.070$
50	$1.4 \pm 0.031$
0	$-0.016 \pm -0.0078$

35

## 内標準を用いた不感時間補正

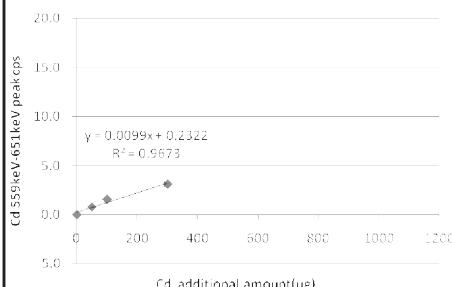


Fig.6-3-5 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was corrected by  $^{57}\text{Fe}$ .)  
(Result when JSS001-4 superposed on filter paper)

Table.6-3-5 count rate for JSS001-4 + Cd standard  
Dead time was corrected by  $^{57}\text{Fe}$ .

Additional amount (μg)	cps
1000	$-105 \pm -232$
500	$15 \pm 3.1$
300	$3.1 \pm 0.21$
100	$1.5 \pm 0.083$
50	$0.76 \pm 0.028$
0	$-0.0092 \pm -0.0053$

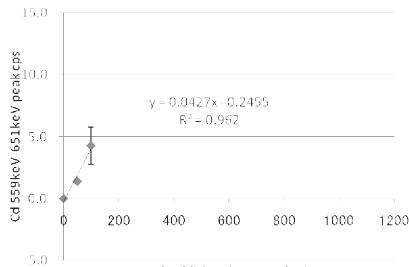


Fig.6-3-6 The change of count rate and Cd additional amount  
(Dead time was corrected by  $^{49}\text{Ti}$ .)  
(Result when JSS904-1 superposed on filter paper)

Table.6-3-6 count rate for JSS904-1 + Cd standard  
Dead time was corrected by  $^{49}\text{Ti}$ .

Additional amount (μg)	cps
1000	$-5.8 \pm -1.8$
500	$-6.3 \pm -2.2$
300	$-65 \pm -4.4$
100	$4.3 \pm 1.5$
50	$1.4 \pm 0.031$
0	$-0.00072 \pm -0.00037$

## 6-4.定量下限値(LLD)

- $3\sqrt{BG}$  でLLDを計算

$$C \times \frac{3\sqrt{BG}}{\text{Peak Area}}$$

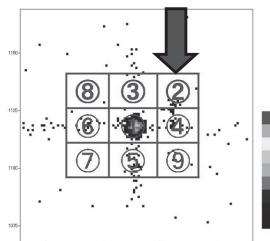
C: Cd 添加量(μg)  
BG: バックグラウンド(Counts)  
Peak Area: ピーク面積(Counts)

- 定量できなかった場合

$$\frac{3\sqrt{BG}}{Co} \quad Co: \text{換算係数(cps/μg)}$$

- 3時間測定に換算した値
- Single spectrum

- 武蔵工大で開発されたγ線解析プログラムGAMA03にて解析



NAAMG → ②をBGの値とした

37

## 6-4.定量下限値(LLD)

Table 6-4-1 LLD of Cd for JSS902-1, 903-1, JSAC0401  
(converted as 3 hour counting)

	Cd LLD	
	μg	ppm
JSS001-4(pure iron)	0.42	3.6
JSS902-1(Blast furnace slag)	0.39	3.8
JSS903-1(Blast furnace slag)	0.39	3.1
JSS904-1(Blast furnace slag)	0.24	1.8
JSAC0401(Brown forest soil)	0.40	2.5

38

## 6-4. 定量下限値(LLD)

Table 6-4-2 Comparison LLD of Cd  
between 2dimensional matrix and single spectrum (detector 32)  
(converted as 3 hour counting)

	Cd LLD(ppm)	
	2dimensional matrix	Single spectrum (detector 32)
JSS001-4	3.6	9.2
JSS904-1	1.8	6.9

高純度鉄 最大3倍改善  
高炉スラグ 最大4倍改善

39

## 57Feピークと133Baピーク

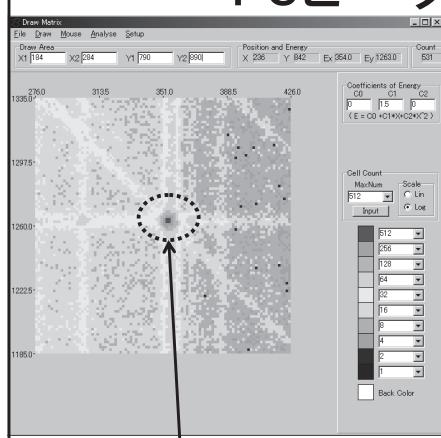


Fig.6-5-1 JSS001-4  
57Fe 352keV-1260keV peak  
(intensity 8.6%)  
(Running time 10130s)

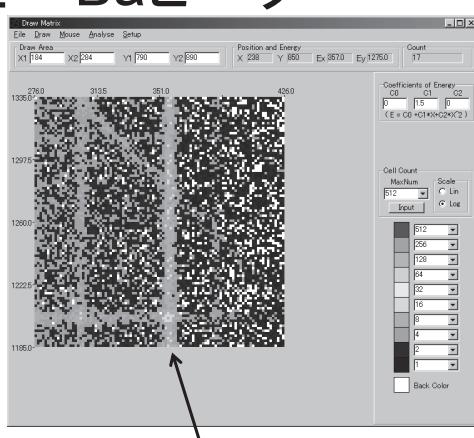
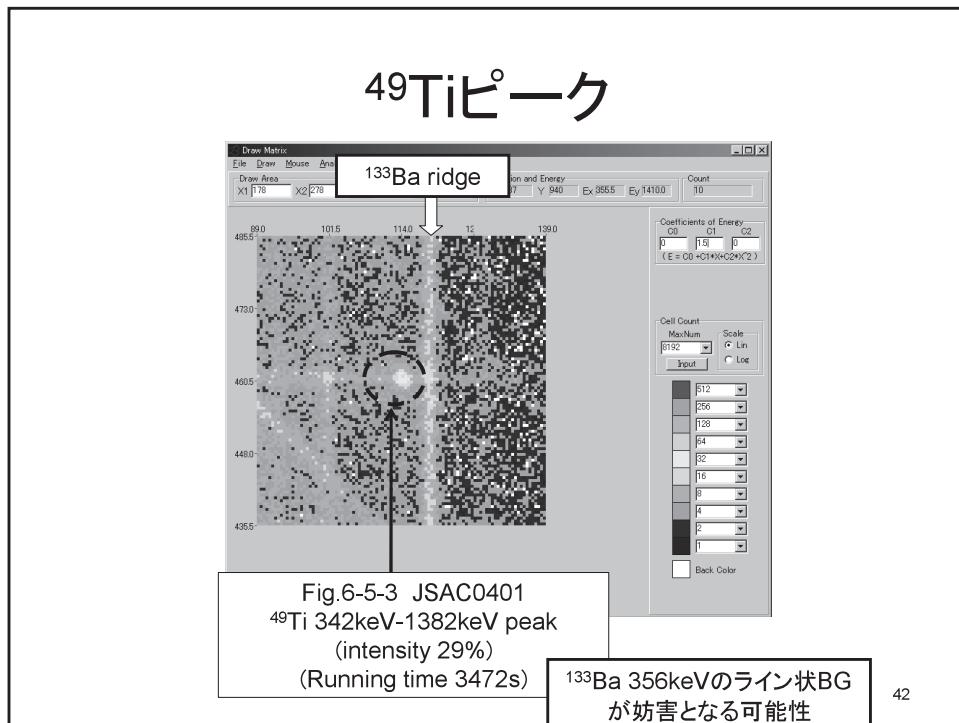
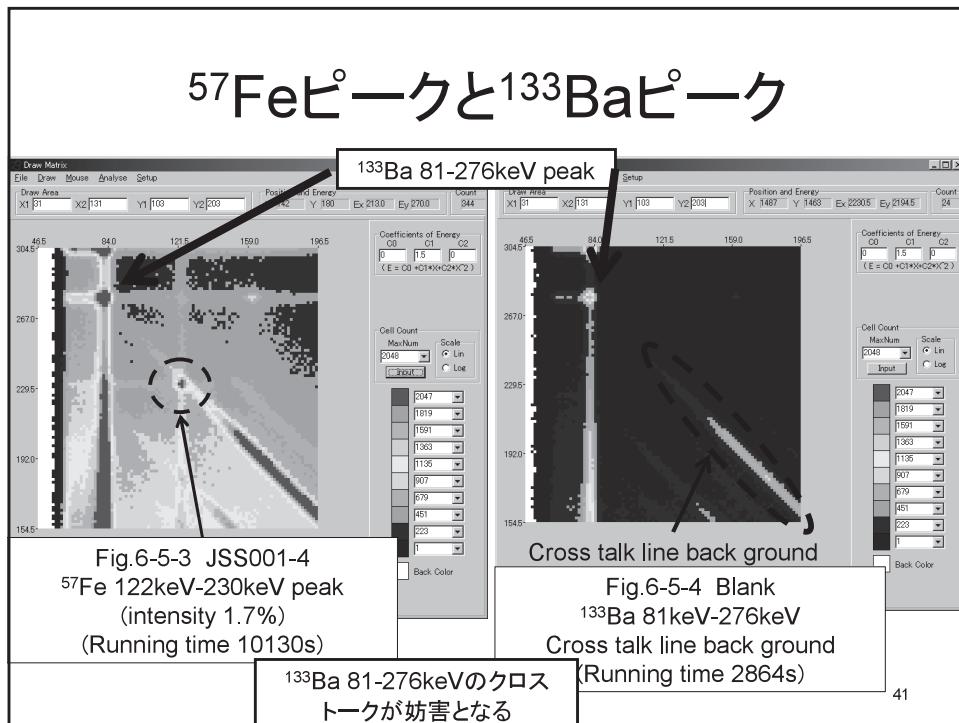


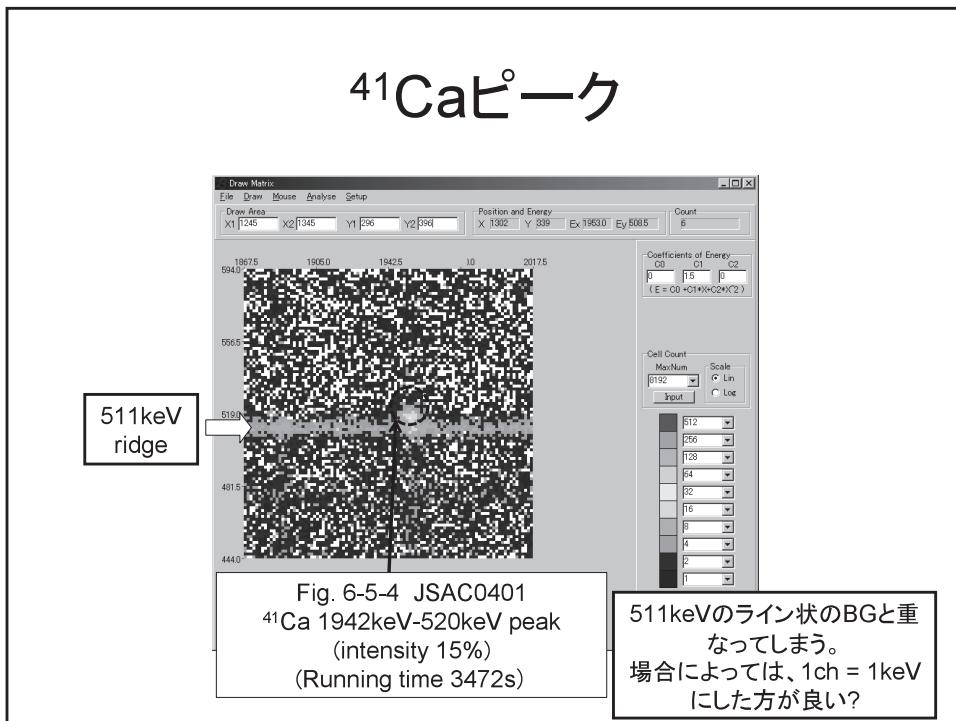
Fig.6-5-2 Blank  
133Ba 356keV ridge  
(Running time 2864s)

133Ba 356keVのライン状BG  
が妨害となる

40



## $^{41}\text{Ca}$ ピーク



## 7.結論

- 高炉スラグ中のCdを多重即発 $\gamma$ 線分析(MPGA)にて分析
  - Cdのピークは、確認されなかった
  - 定量下限値は、1ppmオーダー(3時間測定換算)
  - $\gamma$ - $\gamma$  modeなら数倍LLDは改善されると予想
  - 10分程度の測定では、内標準とするピークが確認できない場合がある
  - $^{133}\text{Ba}$  timerによる不感時間の補正→良好な直線性
  - $^{133}\text{Ba}$  timerは、 $^{57}\text{Fe}$ ピークの妨害となりうる
- 今後の予定
  - 鉄鉱石の分析
  - Cd分析値のある鉄鋼標準物質
  - 製錬工程でCdが気化している場合→フライアッシュに混入の可能性

## 5. 農産物試料測定とMPGA開発

### Measurement of agricultural products and development of MPGA

藤 暢輔、大島 真澄、小泉 光生、木村 敦、古高 和禎

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門 核変換用核データ測定研究グループ  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

Yosuke TOH, Masumi OSHIMA, Mitsuo KOIZUMI, Atsushi KIMURA,

Kazuyoshi FURUTAKA

Innovative Nuclear Science Research Group, Nuclear Science and Energy Directorate,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan

A neutron beam line for multiple prompt gamma-ray analysis was constructed at Japan Atomic Energy Agency. A detector system for MPGA was constructed at the C2-3-2 beam line in January 2005; it comprised eight (upgraded in March 2007) clover Ge detectors with a BGO Compton suppressor. High efficiency detector system provides an advantage in terms of the detection limit of MPGA when compared to the result of PGA. The supermirror neutron bender was improved and a supermirror neutron guide was installed upstream of the sample position. Agricultural products and plastic samples were measured by MPGA.

**Keywords : Multiple Prompt Gamma-ray Analysis, Clover detector, BGO detector,**

#### 1. はじめに

原子力機構研究3号炉中性子ガイドホール冷中性子ビームライン(c-2-3-2)において多重即発ガンマ線測定装置を開発している。この装置は核データ測定及び多重即発ガンマ線分析(MPGA)に用いる。即発ガンマ線検出器としてクローバー型Ge検出器4台とコンプトンサプレッサーとして複数台のBGO検出器から構成される。これらの検出器とその架台、濃縮<sup>6</sup>LiFタイルによる中性子遮蔽、中性子アッテネーター、高速データ収集系などのハードウェアおよびソフトウェアの整備を行ってきた<sup>1,2</sup>。

本稿ではスーパーミラーによる中性子導管を試料設置位置の直線に配置して中性子ビームの拡散を抑える事によりシグナルの増強を行なった結果を報告する。また、農産物等の標準試料に含まれるカドミウムの測定を行った結果から検量線を求め、スクリーニング分析に十分な精度を持つ事を示す。また、同測定において得られた2次元スペクトルと従来法の1次元スペクトルを比較し、従来法では元素同定が困難な場合においても2次元スペクトルにおいては容易に行なえる事を示す。

## 2. スーパーミラーによる中性子導管

シグナル/ノイズ比(S/N 比)は検出限界を向上させるために重要であり、その改善のためにはシグナルを増強することが有効である。シグナルの強度はガンマ線検出器の検出効率と中性子強度が最も影響する。MPGA 装置の試料測定位置の上流部分にスーパーミラーによる中性子導管を設置すれば、中性子ビームの拡散を抑えることにより強度が増強されると期待された。そのためスーパーミラー中性子導管を作成し中性子強度の増強を行った。スーパーミラー中性子導管はトランシットにより設置された後、試料より放出される即発ガンマ線を用いてアライメントの調整を行なった。その後、金箔の放射化法による中性子強度の測定を行った結果、同時に更新されたスーパーミラー中性子ベンダーとスーパーミラー中性子導管により約 9.3 増強された事を確認した。(参照 : OHP 3 ページ目)

## 3. 農産物等の MPGA 測定

MPGA 装置によりカドミウム標準試料を用いた測定を行った。それぞれ 141ppm、22ppm、4.8ppm、1.8ppm のカドミウムを含む 4 つの標準試料の測定を行った。カドミウムは同時計数測定されるガンマ線のうち 558keV と 651keV が最も強い遷移となる。得られた 2 次元スペクトル中から 558keV と 658keV が作るピークカウントを求めて検量線を得た。デッドタイムや中性子フラックス補正前の検量線の決定係数 R2 乗は 0.99661 であった。これを中性子遮蔽体に含まれるフッ素からのガンマ線カウントを用いて補正を行なった結果、リニアリティが改善し、決定係数 R2 乗が 0.99998 となつた(参照 : OHP 9 ページ目)。フッ素のガンマ線を補正に用いる事により十分な精度が得られる事が分かった他、フッ素のガンマ線が試料の重量にも依存するため試料重量の計量も不要となる。これはスクリーニング分析のような大量の試料を測定する場合等において有効だと考えられる。

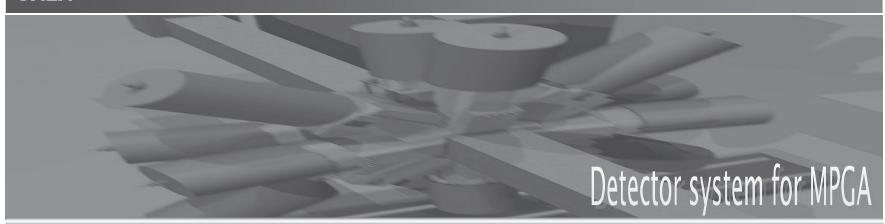
## 4. 元素の同定

元素の同定はガンマ線エネルギーにより行なうが、エネルギーが殆ど同じガンマ線を放出する元素などが存在する試料では同定が困難となる場合がある。MPGA により得られる 2 次元スペクトルを用いた場合、2 つのガンマ線エネルギーによって同定する事になるため、峻別判定が容易になる。Ar と Cl はそれぞれ 516keV と 517keV のガンマ線を放出するが、従来法である 1 次元スペクトルにおいては陽電子消滅ガンマ線である 511keV の強いピークの裾に殆ど重なるピークを形成する(参照 : OHP 10 ページ目)。一方、MPGA における 2 次元スペクトルでは Ar(516keV) と Cl(517keV) のペアとなるガンマ線のエネルギーが Ar(838keV)、Cl(786keV) と異なるため、完全に分離したピークを形成する(参照 : OHP 11 ページ目)。このように MPGA では多くのピークが完全に分離するため、容易に同定出来るほか、信頼性の向上と高精度化も達成される。

## 参考文献

- 1) Y. Toh et al., Appl. Radiat. and Isotopes 64 (2006) 751.
- 2) M. Oshima et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 271 (2007) 317.

JAEA 2007年度 MPGА 連携重点研究会



Detector system for MPGА

## 農産物試料測定とMPGA開発

JAEA



### 内 容

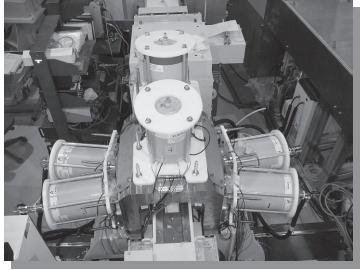
Detector system for MPGА

- 1 はじめに
- 2 MPGА実験装置
- 3 MPGАによる測定
- 4 まとめ

JAEA  
Detector system for MPGA

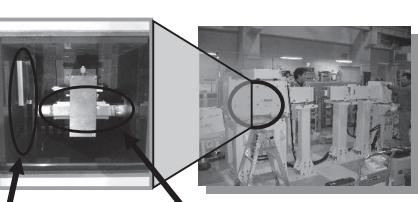
## 多重即発ガンマ線検出装置

**ガンマ線検出装置 STELLA**



- Clover Ge detectors 8
- Coaxial Ge detectors 2
- Twin Ge detectors 2
- BGO detectors

**MPGA 中性子ビームライン**



スーパーミラー中性子ガイド  
中性子減衰板（アクリル板）

前年度、中性子ベンダーの更新とスーパーミラー中性子ガイドの設置により中性子強度が約9.3倍になった。

JAEA  
Detector system for MPGA

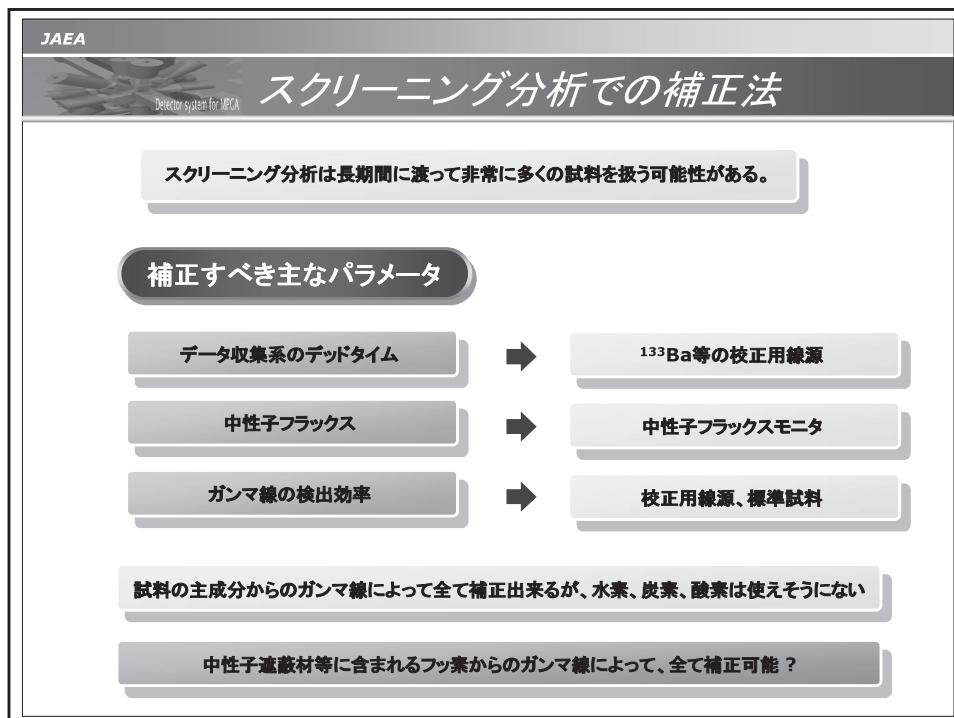
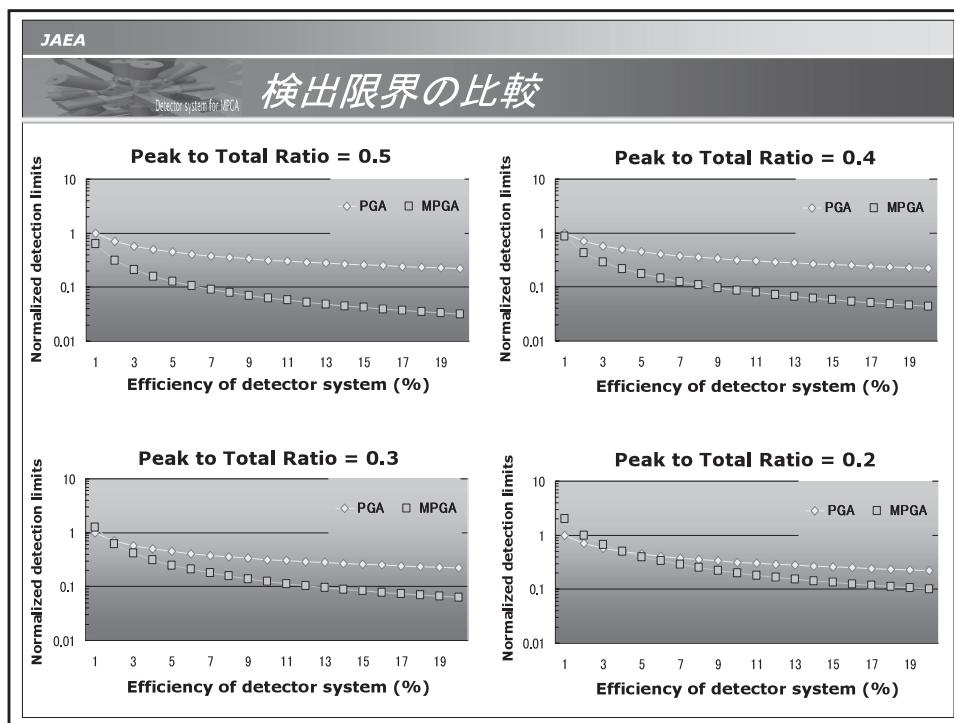
## MPGA装置開発

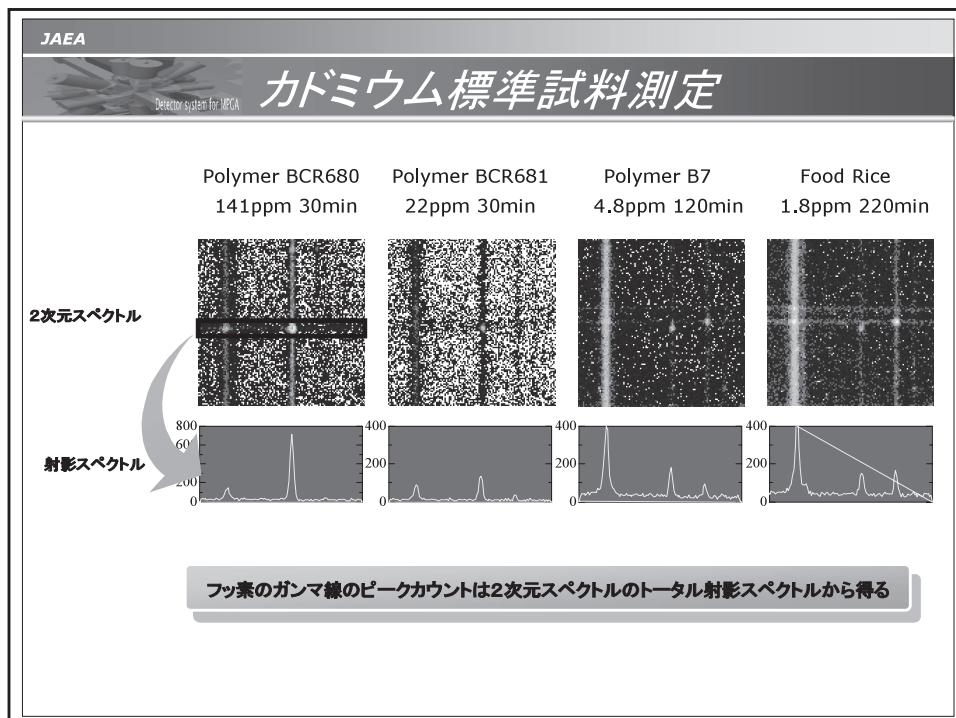
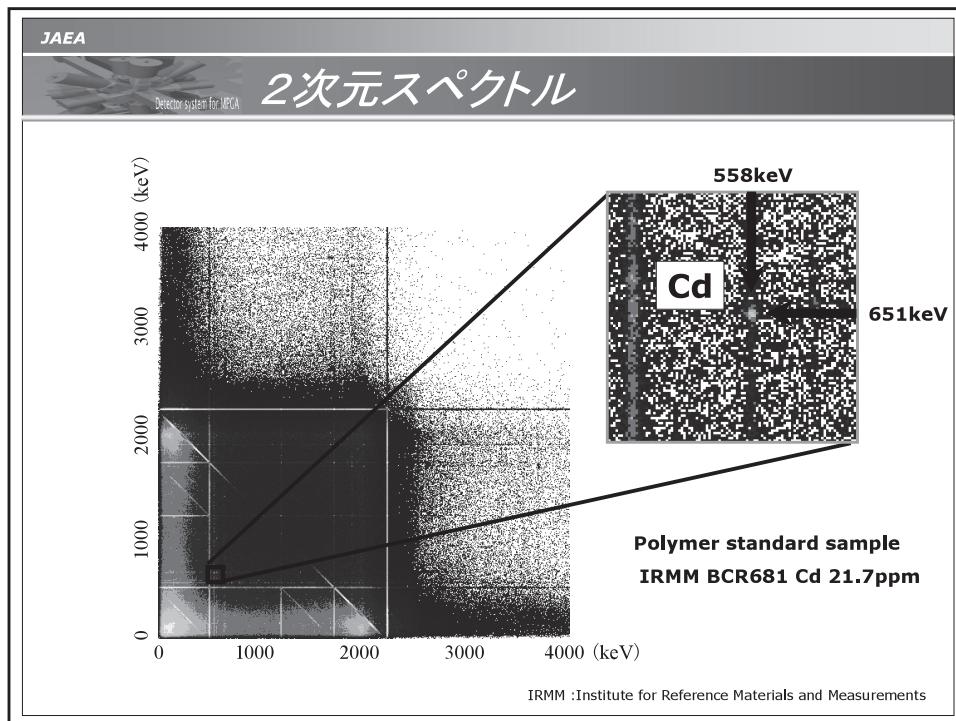
**MPGA開発において重要な要素**

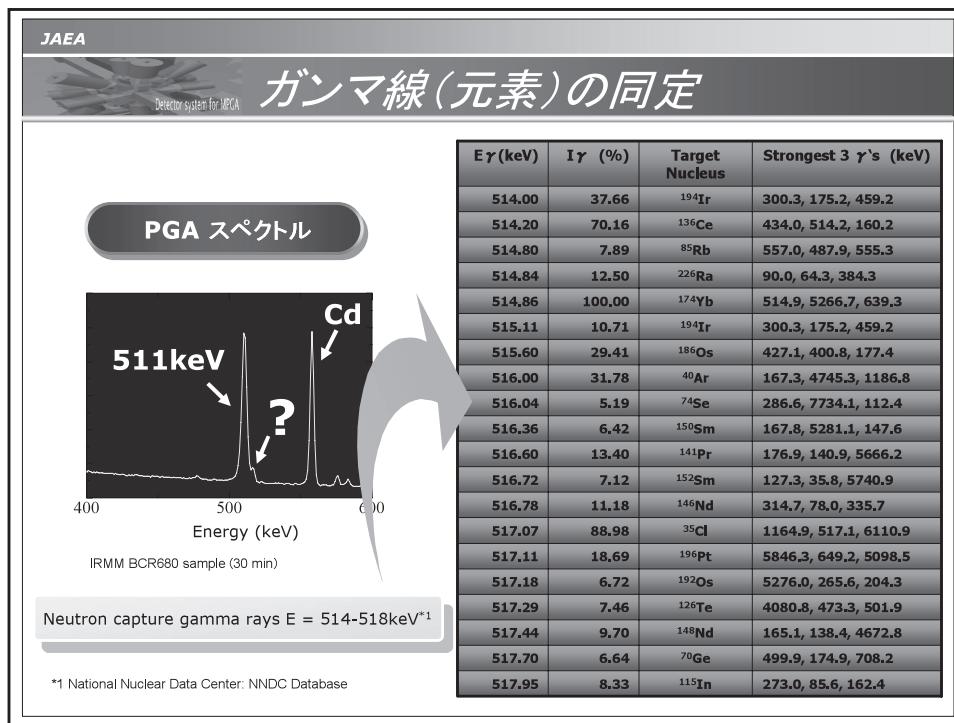
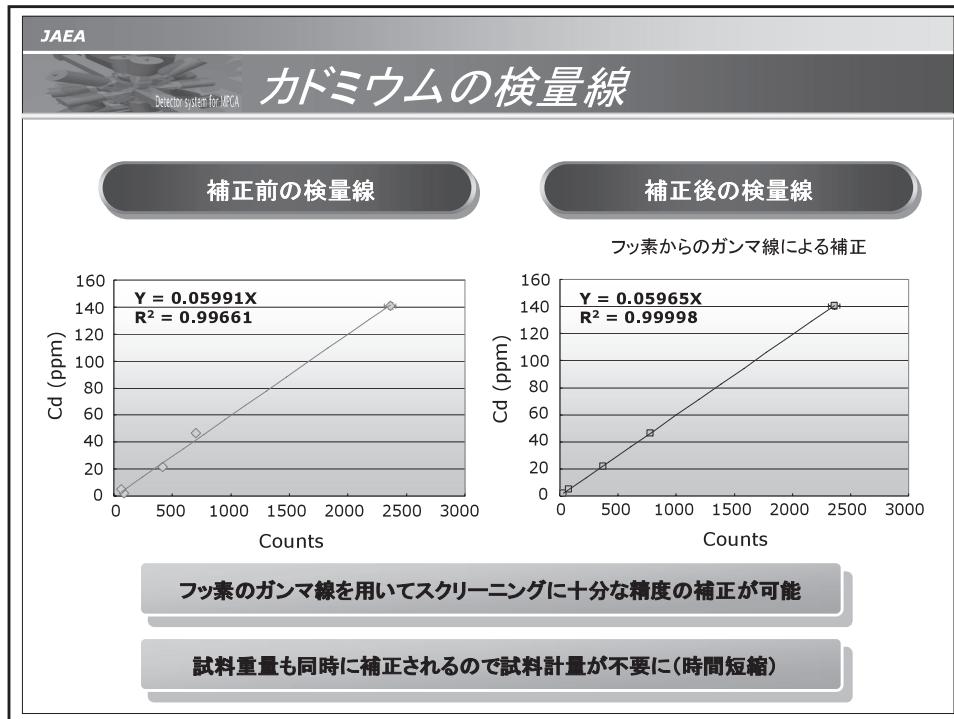
如何にしてシグナル・ノイズ比を改善するか？

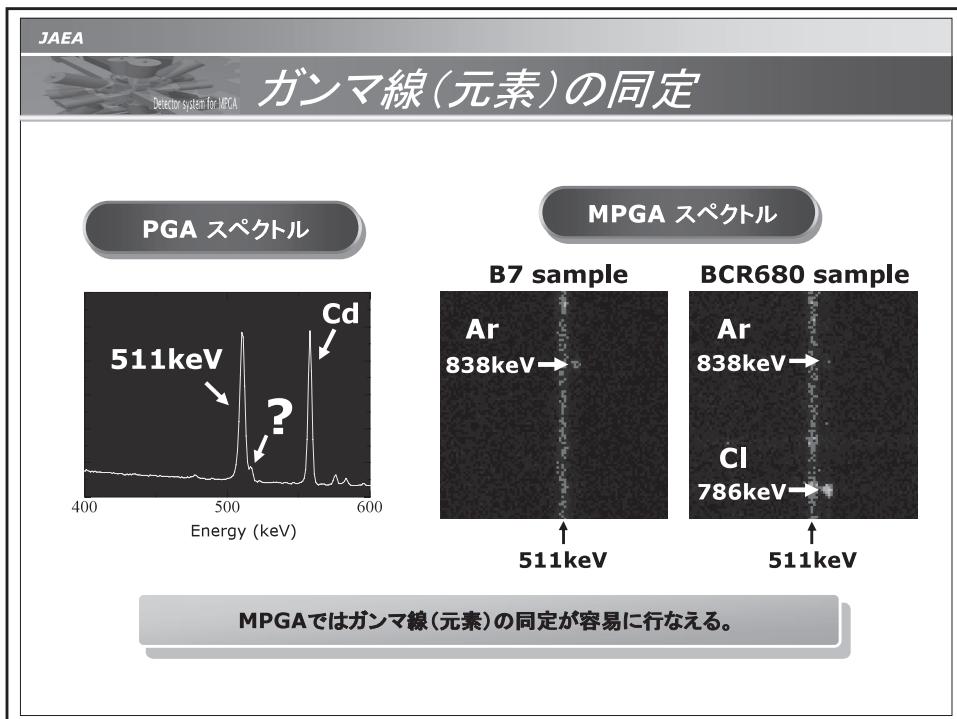
- 即発ガンマ線の絶対検出効率
- コンプトンサプレッション
- 中性子の強度
- 高速・高性能なデータ収集系











- JAEA  
Detector system for MPGA
- ## まとめ
- MPGAにおける重要な開発要素とその状況を示した。
  - MPGAを用いた農産物等のスクリーニング分析において有用と考えられる補正法を示した。今後、サンプル(測定)数を増やして検証する。
  - ガンマ線(元素)の同定がPGAに比べて容易に行なえる事を示した。

## 6. NAAMG と MPGA の応用－産業利用の立場から Application of NAAMG and MPGA – from a standpoint of industrial use

須志田 一義、谷口 舞

株式会社 東レリサーチセンター 無機分析化学研究部

〒520-8567 滋賀県大津市園山 3-3-7

Inorganic Analysis Laboratories, Toray Research Center, Inc.

3-7, Sonoyama 3-Chome, Otsu, Shiga 520-8567, Japan

**NAAMG has been regarded to be an elemental analysis method with high-sensitivity and used for a variety of fields. JAEA is now developing a multiple prompt gamma-ray detection system called as “STELLA”. In order to extend application of these methods to many industrial fields, it will be needed to brush up the sensitivity and originality, especially for MPGA.**

**Keywords : NAAMG (Combination of Neutron Activation Analysis and Multiple Gamma-Ray Detection), MPGA (Multiple Prompt Gamma-Ray Analysis), Industrial Use**

### 1. はじめに

中性子放射化分析法(Neutron Activation Analysis)は壊変ガンマ線を検出する高感度な元素分析法であり、従来から様々な分野に適用してきた。近年、(独)日本原子力研究開発機構は多数の検出器を組み合わせた多重ガンマ線検出器(GEMINI-II)を開発し、従来よりも更に高感度な測定を可能にした。一方で、中性子照射後 10–14s という極めて短時間のうちに発せられる即発ガンマ線を検出する方法(即発ガンマ線分析法)は、従来は感度が悪く、また汎用的では無かった。これに対して、上述の原子力機構は、さらなる高感度化を目指して多重即発ガンマ線検出器(STELLA)を開発中であり、この開発研究には弊社も参画している。現在はJSTの育成研究ファンドも得て、大型Ge検出器の設置も進んでいる。民間利用という観点から、MPGAは今後大きな期待のもてる手法である。

### 2. 産業利用の立場から

半導体関連分野はもちろん、工業材料分野でも材料の高純度化が進んでおり、微量元素分析の要求は高い。現在、この要求に応える分析手法としては黒鉛炉加熱原子吸光分析法やICP質量分析法が実験室系として広く用いられている。しかし、原則的に酸分解などによる前処理(溶液化)が必要であり、多大な時間と労力を要する。これに対して、多重ガンマ線を検出する表記2分析手法は、原子炉という大型施設を必要とはするが、化学的前処理を必要としないため、迅速に高感度な分析結果を得ることが出来る。ここでは当該手法を民間利用しようという考え方から、適用分野と適用試料を考えてみた。ビームの広がりからもバルク試料が対象であり、ガスなどを発生しない固体試料が中心となるが、機能デバイス分野、材料分野、環境分野などでかなり多くの試料を対象と出来る可能性がある。今後、より一層装置をブラッシュアップし、高感度化を目指すとともに、当該手法の独自性を明確にしていく必要がある。

以上

## 中性子放射化分析とMPGAの対応可能な分野-3

**希望納期と試料形状等から適用可能と判断された分野の試料種:**

希望納期*	試料形状・規制等の制約
・機能デバイス分野	○ パルク／〇
	{<試料種>   研究・開発上の問題   国家PJ }: ハンダ素材、セラミックス、ガラス、金属ターゲット 炭素材料など : 単結晶、多結晶シリコン、化合物半導体
・材料分野	○ パルク／〇
	{<試料種>   研究・開発上の問題   国家PJ }: 各種ポリマー(フッ素樹脂)、炭素材料、金属・合金 化粧品 : ナノ材料
・環境分野	○ パルク(切断品)／〇
	{<試料種>   連続廃棄物管理品   研究・開発上の問題   国家PJ }: CP、各種家電品の裁断品等 : 各種固体材料 : 核廃棄物?

 Toray Research Center, Inc.

## 中性子放射化分析とMPGAの対応可能な分野-4

**当面、産業利用として狙いたい測定**

- 各種バルク材料中のハロゲン(Cl, Br, I)分析
- ポリマー
- 各種バルク材料中の貴金属(Pt, Rh, Ru)分析
- 炭素材料
- 各種バルク材料中の遷移金属(Fe, Ni, Cr, Cu)分析
- 単結晶・多結晶シリコン
- 各種バルク材料中の重金属(Cr, Cd, As, Pb)分析
- PC裁断品\*
- \*: CP構成部材などの裁断品(チップ状試料)等

 Toray Research Center, Inc.

This is a blank page.

# 国際単位系 (SI)

表 1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長 質 時 電 热力学 物 光	メートル キログラム 秒 アンペア ペルルモル カンデラ	m kg s A mol cd

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面 体 速 度 加 速 波 数	積 平 方 級 立 法 一 ト ル	$\text{m}^2$
時 間 電 流 測 測	度 一 ト ル 每 秒	$\text{m}^3$
電 力 波 数	度 一 ト ル 每 秒	$\text{m}/\text{s}$
熱力学温度	度 一 ト ル 每 秒	$\text{m}/\text{s}^2$
物質量	度 一 ト ル	$\text{m}^{-1}$
光 度	(物質量) 濃度 輝 度	$\text{kg}/\text{m}^3$
	度 一 ト ル 每 立 方 メートル	$\text{m}^3/\text{kg}$
	度 一 ト ル 每 立 方 メートル	$\text{A}/\text{m}^2$
	度 一 ト ル 每 立 方 メートル	$\text{A}/\text{m}$
	度 一 ト ル 每 立 方 メートル	$\text{mol}/\text{m}^3$
	度 一 ト ル 每 立 方 メートル	$\text{cd}/\text{m}^2$
	(数の) 1	1

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨ タ	Y	$10^{-1}$	デ シ	d
$10^{21}$	ゼ タ	Z	$10^{-2}$	セ ヌ チ	c
$10^{18}$	エ ク サ	E	$10^{-3}$	ミ リ	m
$10^{15}$	ペ タ	P	$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{12}$	テ ラ	T	$10^{-9}$	ナ ノ	n
$10^9$	ギ バ	G	$10^{-12}$	ピ コ	p
$10^6$	メ ガ	M	$10^{-15}$	フ ェ ム フ	f
$10^3$	キ ロ	k	$10^{-18}$	ア ト	a
$10^2$	ヘ ク ト	h	$10^{-21}$	ゼ ブ ツ	z
$10^1$	デ カ	da	$10^{-24}$	ヨ ク ト	y

表 3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	他のSI単位による表し方
平立周压力	面角ラジアン	rad	$\text{m} \cdot \text{m}^{-1} = 1$
エネルギー、仕事、熱量	角ステラジアン	sr	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} = 1$
工率、放射束	波数ヘルツ	Hz	$\text{s}^{-1}$
電荷、電気量	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電位差(電圧)、起電力	ニュートン	N	$\text{N}/\text{m}^2$
静電容量	バースカル	Pa	$\text{N} \cdot \text{m}$
電気抵抗	ワット	W	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
コンダクタンス	ワット	W	$\text{J}/\text{s}$
磁束密度	アーバ	A	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
インダクタンス	アーバ	A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
セルシウス温度	ヘルツ	Hz	$\text{s} \cdot \text{A}$
光束度	ヘルツ	Hz	$\text{W}/\text{A}$
(放射性核種)の放射能	ヘルツ	Hz	$\text{C}/\text{V}$
吸収線量、質量エネルギー	ヘルツ	Hz	$\text{V}/\text{A}$
分率、カーマ	ヘルツ	Hz	$\text{A}/\text{V}$
線量当量、周辺線量当量	ヘルツ	Hz	$\text{Wb}/\text{m}^2$
方向性線量当量、個	ヘルツ	Hz	$\text{Wb}/\text{A}$
人線量当量、組織線量当量	ヘルツ	Hz	$\text{K}$

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもつた量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度 $\text{m}^\circ\text{C}$ のようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表 4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa · s	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N · m	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
表面張力	ニュートンメートル	N/m	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} = \text{s}^{-1}$
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s <sup>2</sup>	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{s}^{-2}$
熱流密度、放射照度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
熱容量、エンタルピー	ジュール每ケルビン	J/K	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量熱容量(比熱容量)	ジュール每キログラム	J/(kg · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
質量エネルギー	ジュール每ケルビン	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
質量エネルギー(比エネルギー)	ジュール每キログラム	J/kg	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
熱伝導率	ワット每メートル每ケルビン	W/(m · K)	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
体積エネルギー	ジュール每立方メートル	J/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
電界の強さ	ボルト每メートル	V/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
体積電荷	クーロン每立方メートル	C/m <sup>3</sup>	$\text{m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
電気変位	クーロン每平方メートル	C/m <sup>2</sup>	$\text{m}^{-2} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
誘電率	ファラード每メートル	F/m	$\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
透磁率	ヘンリー每メートル	H/m	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$
モルエネルギー	ジュール每モル	J/mol	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$
モルエントロピー	ジュール每モル每ケルビン	J/(mol · K)	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$
モル熱容量	ジュール每モル每ケルビン	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン每キログラム	C/kg	$\text{kg}^{-1} \cdot \text{s} \cdot \text{A}$
吸収線量率	グレイ每秒	Gy/s	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$
放射強度	ワット每平方メートル	W/m <sup>2</sup>	$\text{m}^4 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
放射輝度	ワット每平方メートル每ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> · sr)	$\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} = \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$

表 9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルゴ	erg	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
ダイナ	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$
ボアズ	P	$1 \text{ P} = 1 \text{ dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガウス	G	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
エルステッド	Oe	$1 \text{ Oe} = (1000/4\pi) \text{ A/m}$
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb}$
スチル	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd}/\text{cm}^2 = 10^4 \text{ cd}/\text{m}^2$
ホルト	ph	$1 \text{ ph} = 10^4 \text{ lx}$
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm}/\text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリ	Ci	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
レントゲン	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$
ラド	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$
レム	rem	$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$
X線単位	IX unit	$1 \text{ IX unit} = 1.002 \times 10^{-4} \text{ nm}$
ガンマ	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$
ジャニスキー	Jy	$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フェルミ	fermi	$1 \text{ fermi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat} = 200 \text{ mg} = 2 \times 10^{-4} \text{ kg}$
トル	Torr	$1 \text{ Torr} = (101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$
カリヨリ	cal	$1 \text{ cal} = 1 \text{ J}$
ミクロ	μ	$1 \mu = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

