



PGA を用いたホウ素イメージング

土川 雄介

J-PARC Center, JAEA

J-PARC Center, JAEA

甲斐 哲也, 篠原 武尚, 及川 健一, 原田 正英

Oarai Research & Development Institute, JAEA

阿部 雄太

Graduate School of Engineering, Osaka University

大石 佑治

Comprehensive Research Organization for Science and Society (CROSS)

Joseph D. Parker, 松本 吉弘

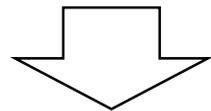
Collaborative Laboratories for Advanced Decommissioning Science (CLADS), JAEA

永江 勇二, 佐藤 一憲

福島第一原子力発電所 (1F) の廃炉に伴う解体作業
溶融、再凝固したデブリ中にホウ素が含まれている可能性

(Y. Abe, *et al.*, Jour. of Nucl. Eng. and Rad. Sci., NERS-19-1047 (in press).)

- ▶ ホウ化物は高い硬度 (酸化物の約二倍) を持つため解体作業が困難
- ▶ ホウ素は高い中性子吸収断面積を持つため、
解体時ホウ素分離による非再臨界確認のための基礎データ取得
 - ▶ デブリ中のホウ素分布 (溶融時のホウ素の挙動)



を把握することが必要

BWRの炉心溶融・移行挙動解明のため実施した加熱試験後の
模擬燃料集合体 (CMMR試験体)を用いた事前調査

(多量の) ホウ素を含むサンプル中のホウ素分布
イメージング技術の開発 @ J-PARC/MLF

CMMR 試験体

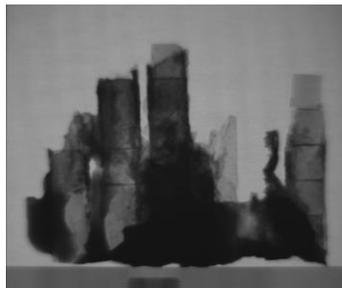


CMMR 試験体、較正用標準試料

CMMR 試験体

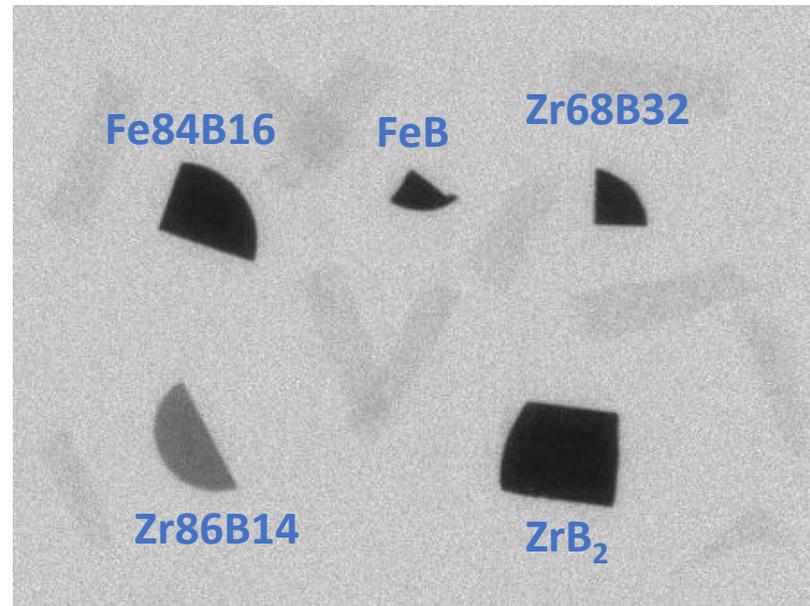


中性子透過像



較正用
標準試料

ZrB type: Zr68B32 , Zr86B14 , ZrB_2
FeB type: FeB , Fe84B16

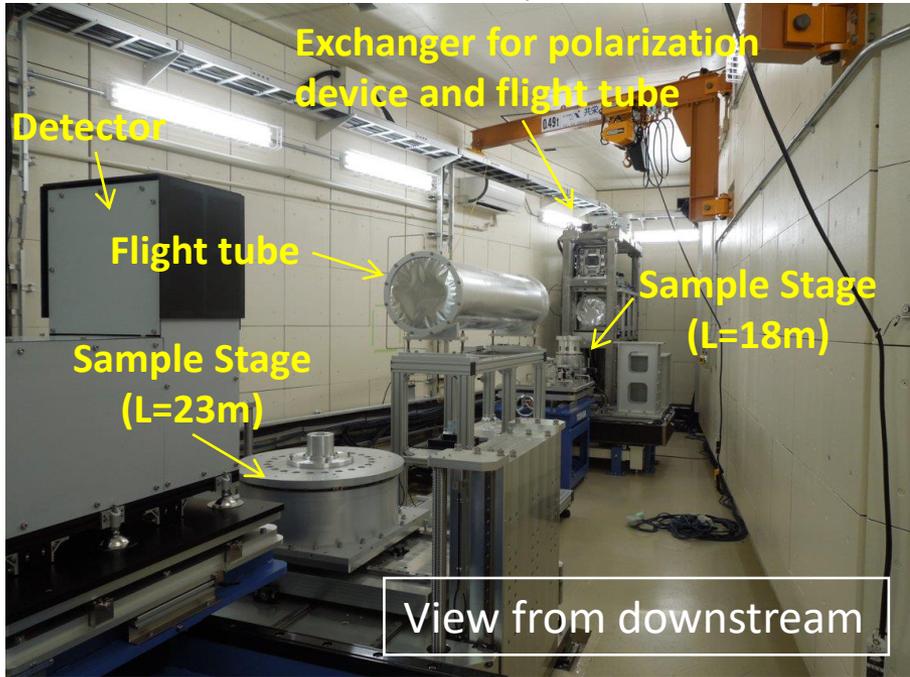


Properties of the
reference samples

Sample	Zr68B32	Zr86B14	ZrB_2	FeB	Fe84B16
Thickness mm	3.149	1.946	5.326	1.420	4.115
Mass(Total, B) mg	489, 26	709, 13	3480, 651	1420, 26	2210, 79

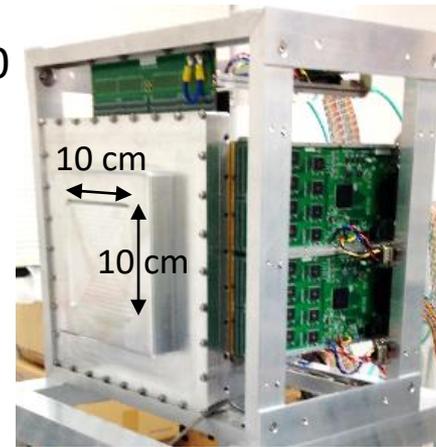
Energy-resolved neutron imaging system

- ▷ Neutron intensity:
 - 1.7×10^7 n/s/cm²/MW (<0.45 eV)
 - 1.1×10^8 n/s/cm² (<1 MeV)
 - ▷ L/D: various values are available from 180 to 7500
- μNID を使った E-resolved な測定も進行中
(本トークは CCD カメラのみ)



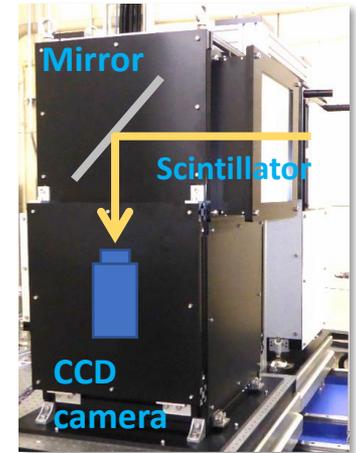
μNID

μPIC-based TPC



CCD Camera

⁶LiF scintillator & CCD camera

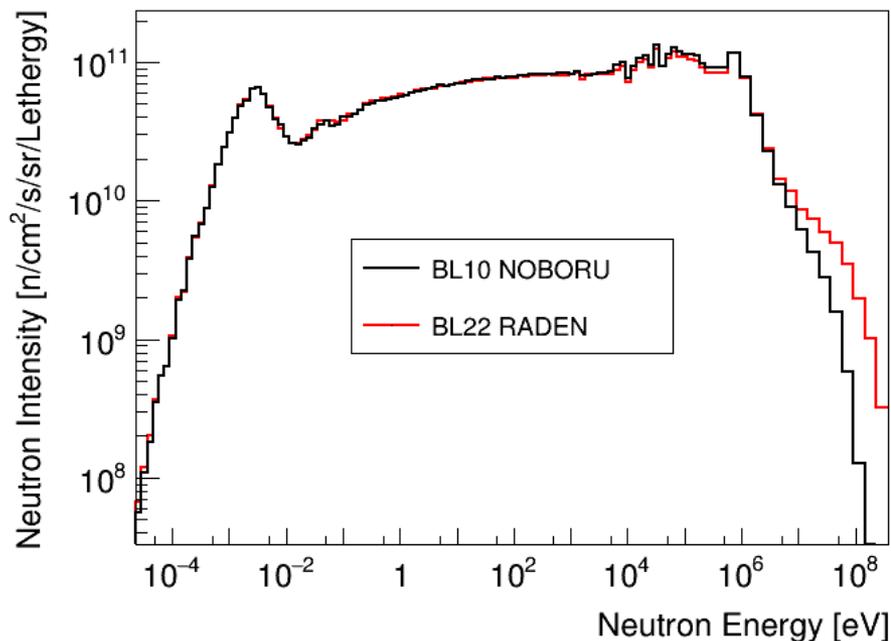


	μNID	CCD camera
Field of view	□ 100 mm	< □ 300 mm
Spatial resolution	100 μm	> 30μm
Effective count rate	1 Mcps	---
Time resolution	250 ns	---

Energy-resolved neutron imaging system

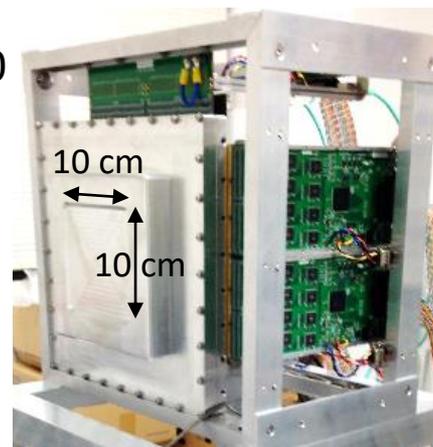
- ▷ Neutron intensity:
 - 1.7×10^7 n/s/cm²/MW (<0.45 eV)
 - 1.1×10^8 n/s/cm² (<1 MeV)
- ▷ L/D: various values are available from 180 to 7500

uNID を使った E-resolved な測定も進行中
(本トークは CCD カメラのみ)



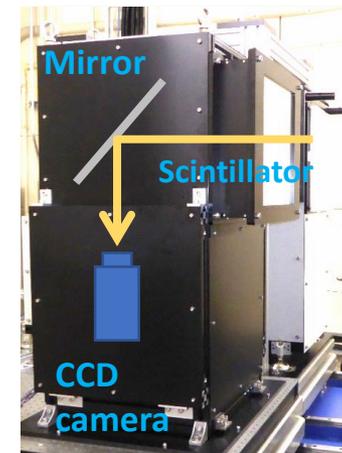
μNID

μPIC-based TPC



CCD Camera

⁶LiF scintillator & CCD camera



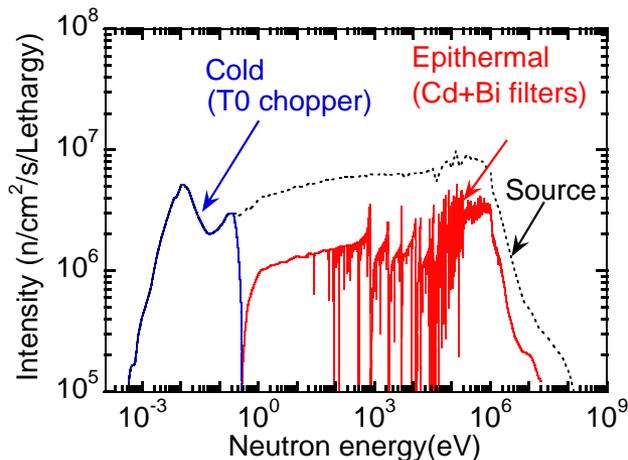
	μNID	CCD camera
Field of view	□ 100 mm	< □ 300 mm
Spatial resolution	100 μm	> 30 μm
Effective count rate	1 Mcps	---
Time resolution	250 ns	---

CMMR 試験体の中性子イメージング

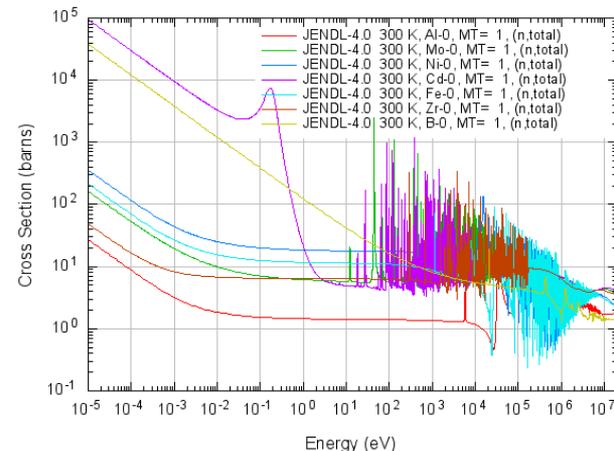
Fast/Cold NR/NT



ca. 90 mm



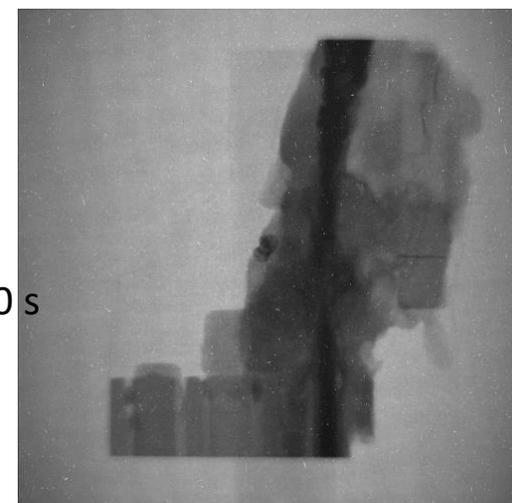
Cold (<0.3 eV)



Epi-thermal (>0.45 eV)



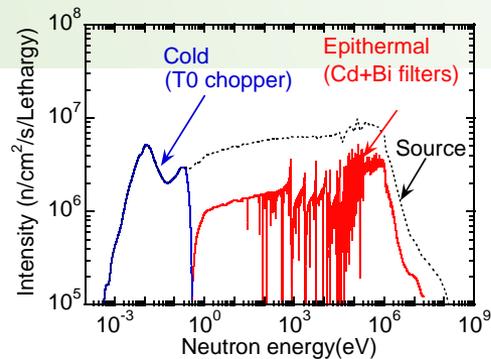
Exp. Time:
Cold: 24 s
Epi-th: 140 s



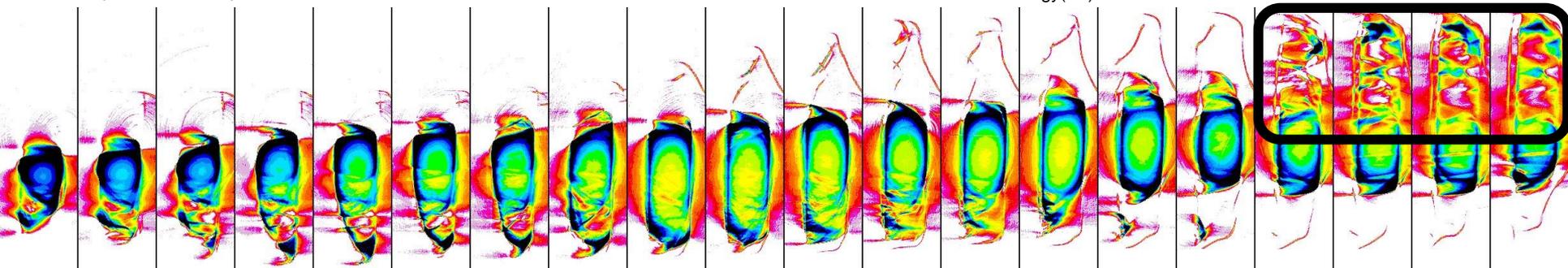
CMMR 試験体の中性子イメージング

Fast/Cold neutron Radiography & CT

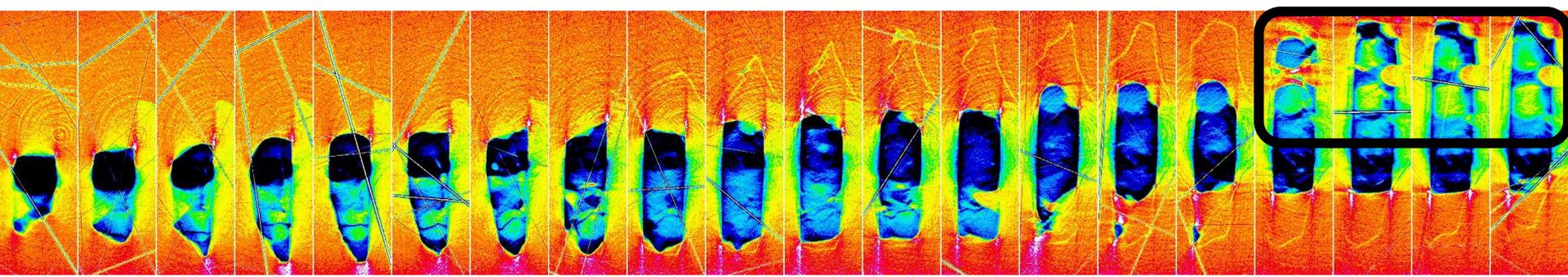
Simulated melted core sample (CMMR2-1)

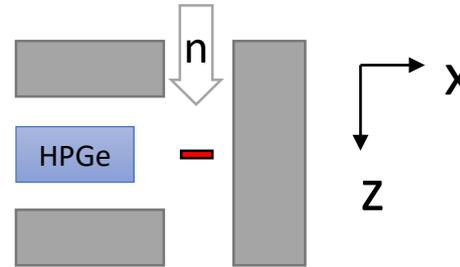
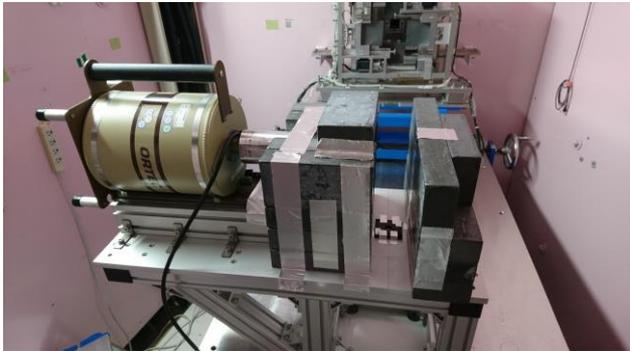


Cold (<0.3 eV)

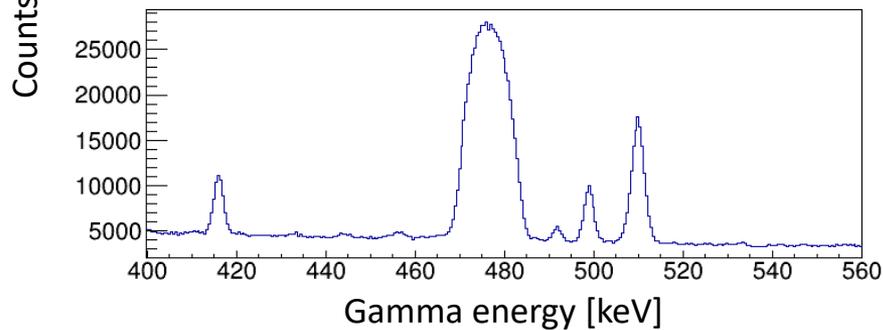
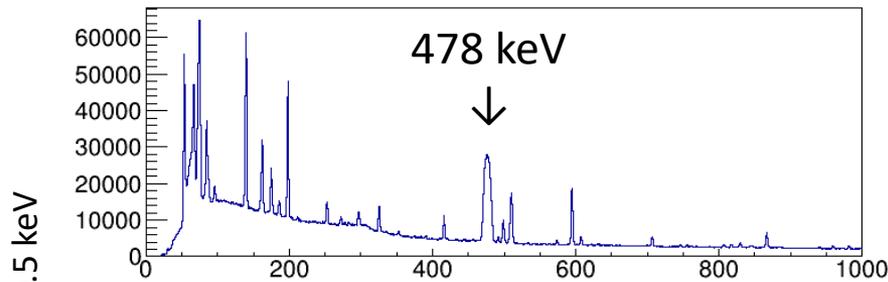
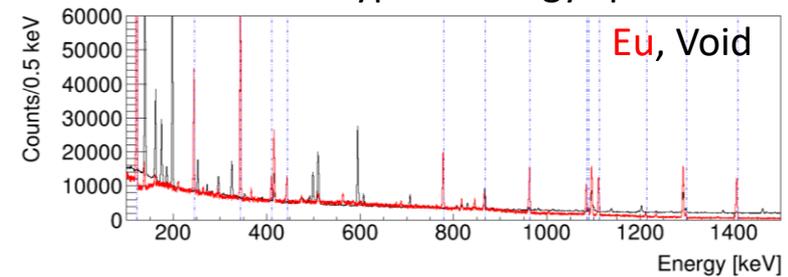


Epi-thermal (>0.45 eV)





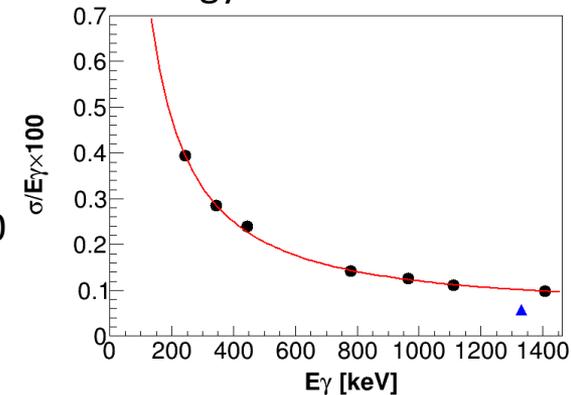
Typical energy spectrum



BL10/NOBORU

HPGe detector:
ORTEC GMX10P4
ADC:
SEIKO EG&G MCA7600

Energy resolution



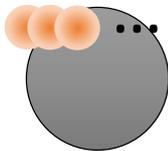
ラジオグラフィでは、ホウ素のみの分布を得ることが難しい

▷ PGA を用いた $B(n,\gamma)$ 由来の 478 keV- γ の分布を測定

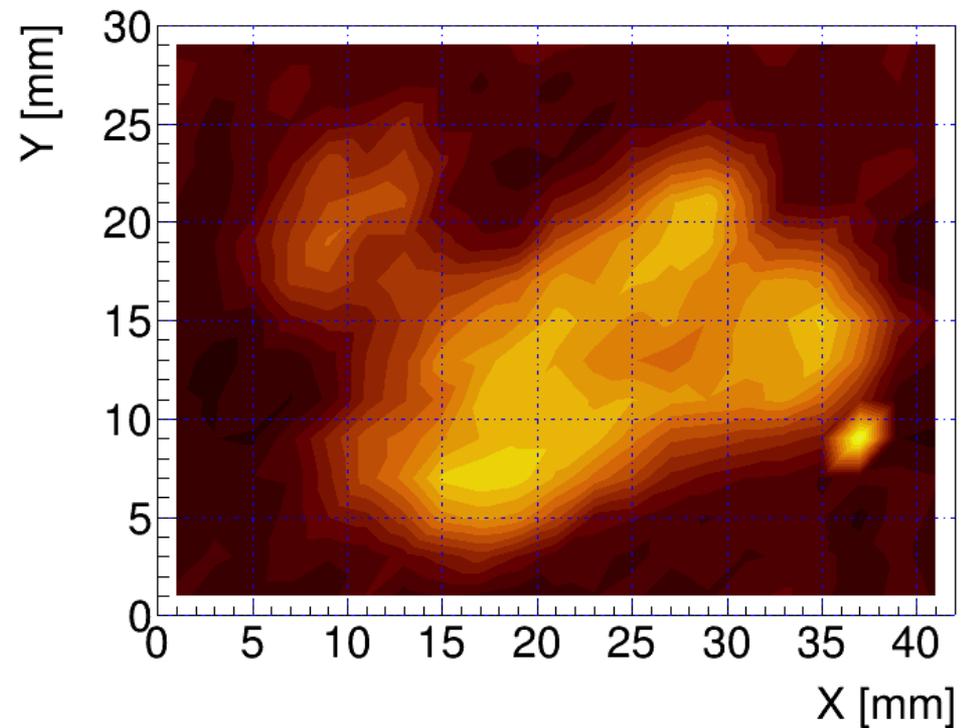
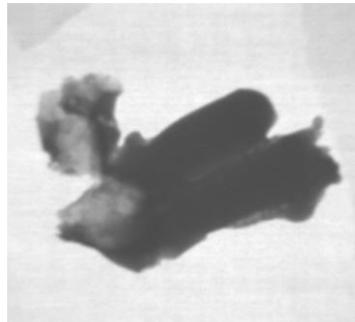
$\phi 5$ mm ペンシルビーム

2 mm ステップで 21x15 点照射

478 keV- γ 線量の二次元分布を測定



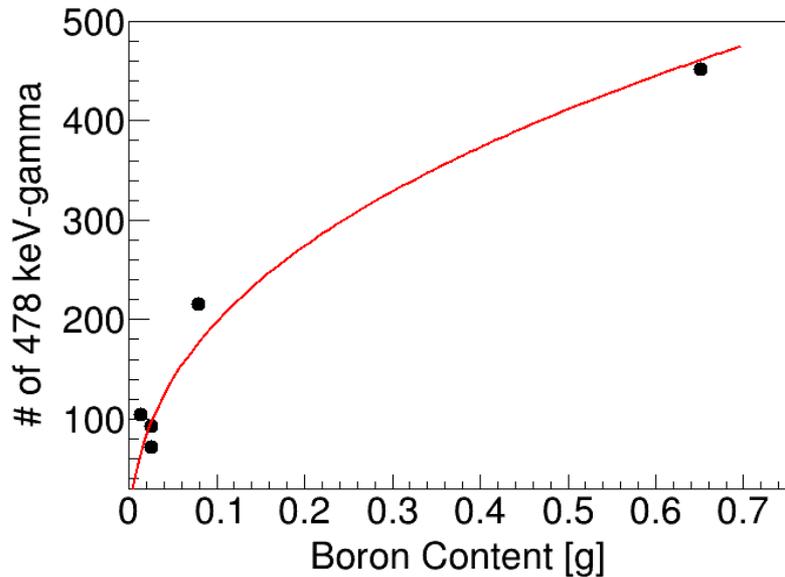
Radiograph



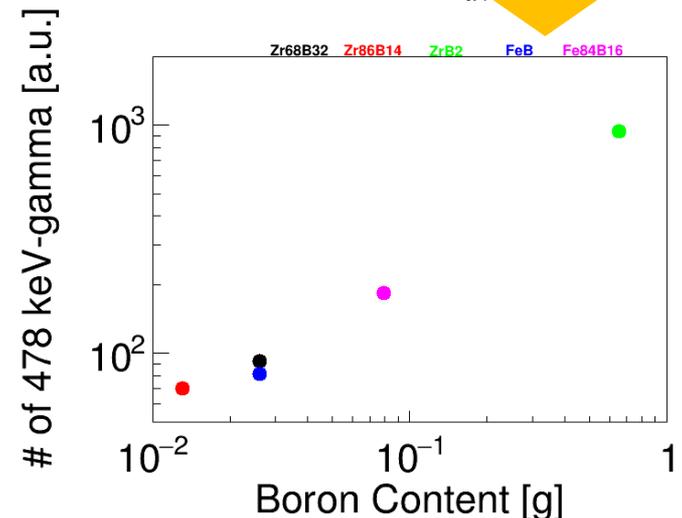
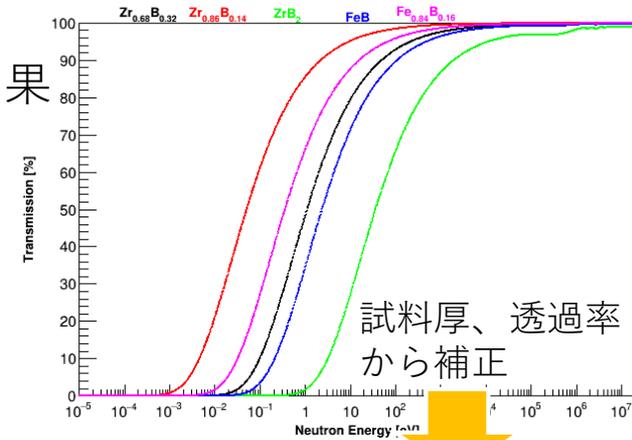
含有ホウ素量 - 478 keV 即発ガンマ線量の相関

計量線の測定：含有ホウ素量 - 478 keV 即発ガンマ線量の相関

ホウ素を多く含むことによるサンプルの中性子自己遮蔽効果
▶ 相関曲線を事前に知る必要がある (測定系に依存)



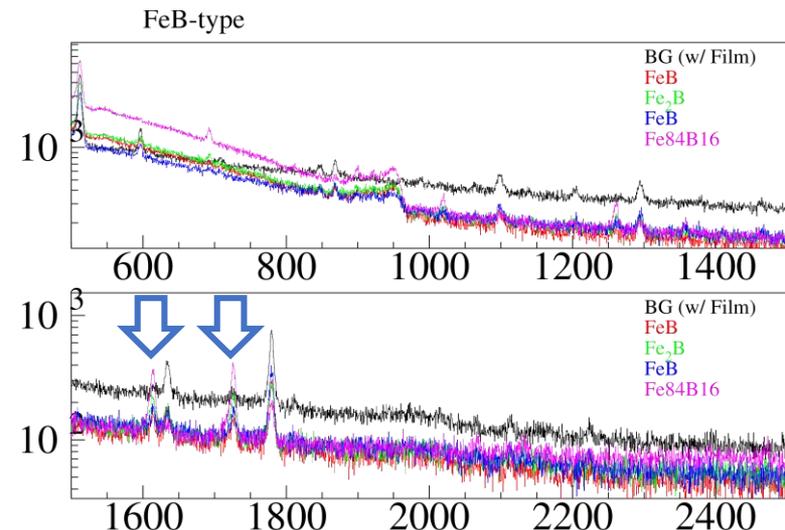
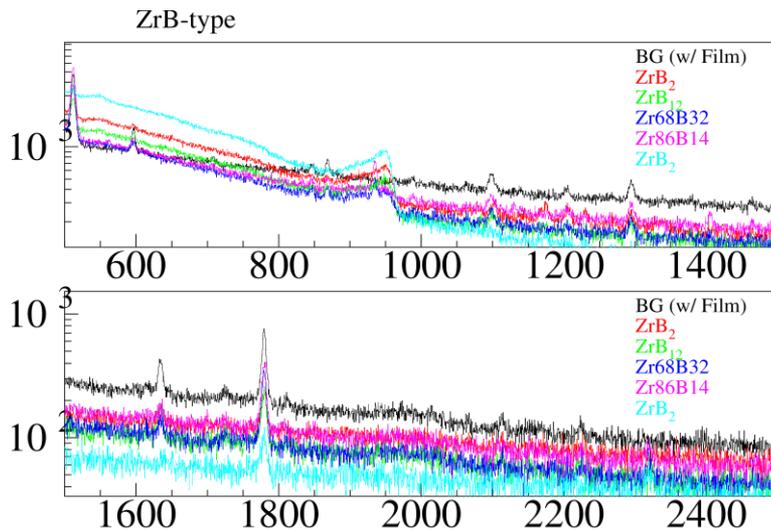
振る舞いは中性子エネルギーに依存



- ✓ 試料中のホウ素量の測定
- ・ホウ素が蓄積するプロセスの理解

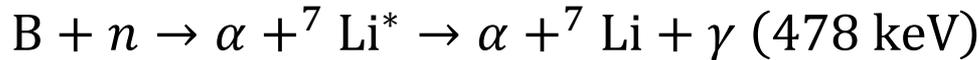
ホウ素は ZrB や FeB をはじめとしたホウ化物として存在している

- ▷ 特に Zr は $Zr(n,\gamma)$ 断面積が非常に小さい
- ▷ ガンマ線ピークによる同定は困難



478 keV γ 線は有意なドップラー幅で測定される

Y. Sakai, *et al.*, Journal of Nuclear and Radiochemical Science 2, 1 (2001).



$$f(E) = \frac{cN_0\lambda}{2E_0v_0(\lambda-D)} \left[1 - \left(\frac{c|E-E_0|}{E_0v_0} \right)^{\frac{\lambda-D}{D}} \right]$$

Red letters denotes free parameters in the fitting

$$(E_0(1 - v_0/c) \leq E \leq E_0(1 + v_0/c))$$

D : inverse of the deceleration time constant of ${}^7\text{Li}^*$ inside materials,

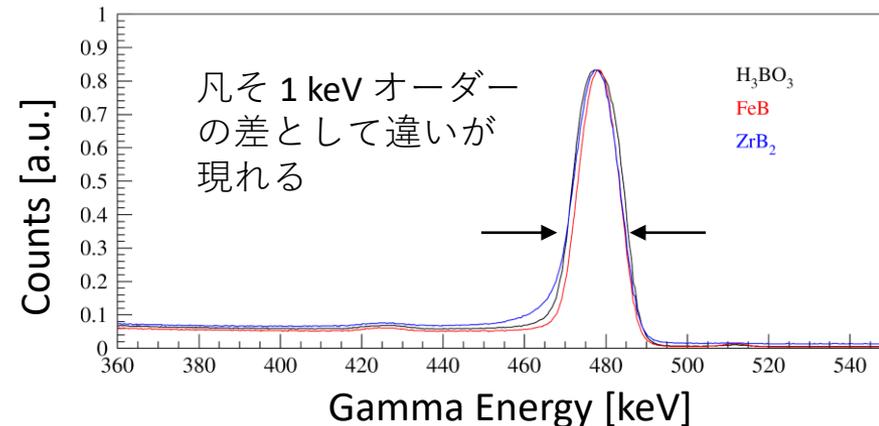
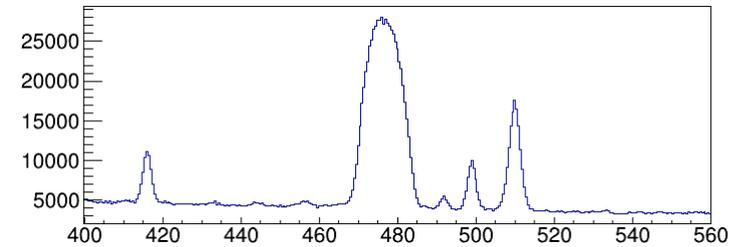
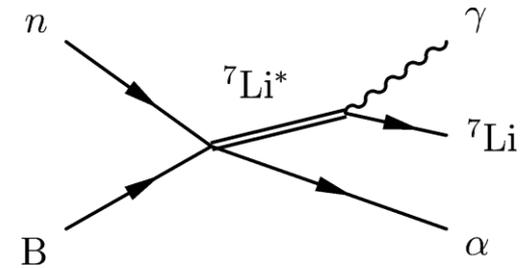
c : the speed of light,

$v_0 = 4.6 \times 10^6$ m/s: initial velocity of ${}^7\text{Li}^*$,

$\lambda = 9.49 \times 10^{12}$ 1/s: disintegration constant of ${}^7\text{Li}^*$,

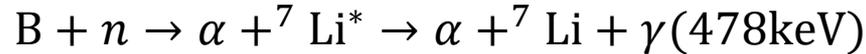
E_0 : the central peak value (478 keV), and

N_0 : normalization constant corresponding to the total amount of 478-keV gamma rays.



478 keV ピークのドップラー広がり

ホウ素の 478 keV ピークの幅について



Li^* の初期運動 E 840 keV (寿命は 10^{-13} s と比較的短い) γ 放出までの間に飛行する為、ドップラー効果により、 γ エネルギーは 478 keV から変化する

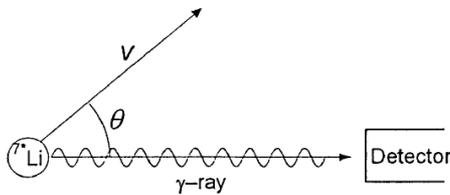


Figure 1. Detection of a γ -ray emitted from ${}^7\text{Li}$ in flight. The angle between the velocity vector of ${}^7\text{Li}$ and the observed γ -ray is θ .

Journal of Nuclear and Radiochemical Sciences, Vol. 1, No. 2, pp. 83–85, 2000

M. Magara, C. Yonezawa/Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 411 (1998) 130–136

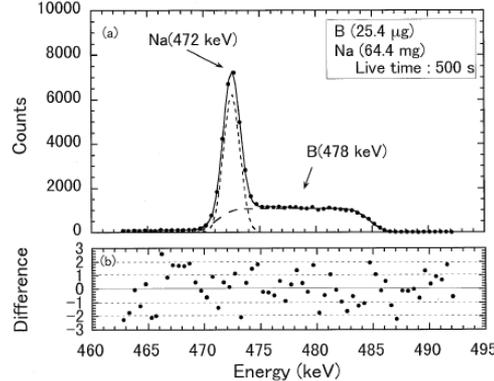


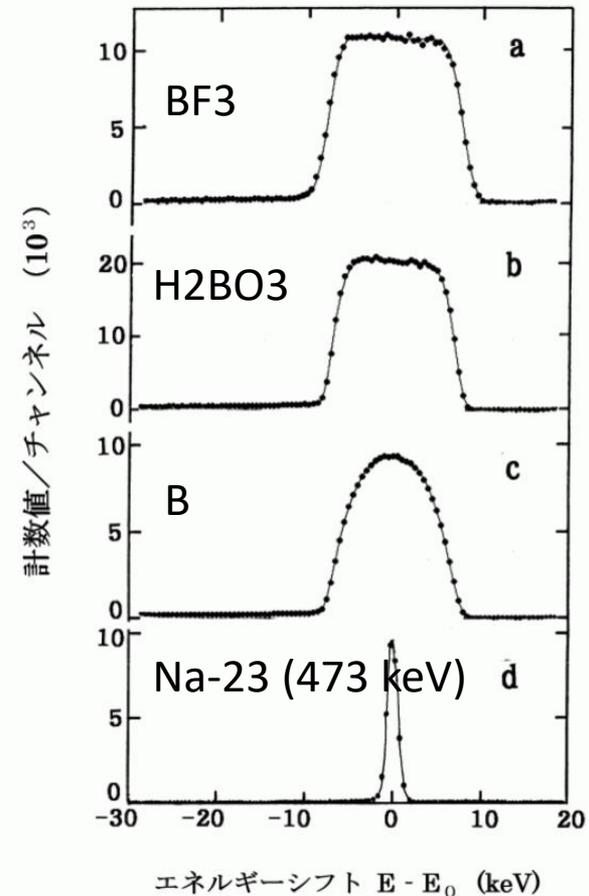
Fig. 2. Selected portion of the prompt γ -ray spectrum from a mixed boron and sodium sample showing the 472 keV sodium interference to the boron peak. The notation is the same as in Fig. 1.

$$g(E) = \frac{cN_0}{2E_0v_0} \lambda \left[1 - \left(\frac{c|E-E_0|}{E_0v_0} \right)^D \right] \quad (|\Delta E| \leq \Delta E_{\max}) \quad (12)$$

c, E_0, v_0, λ :

光速度、即発 γ 線ピークエネルギー(=478keV)、

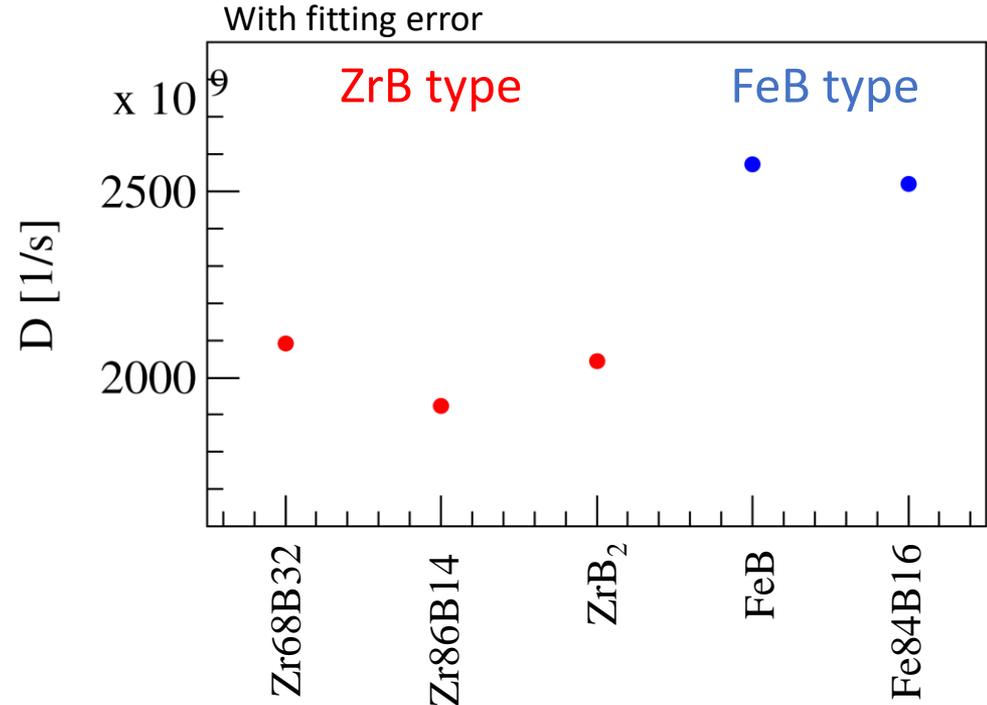
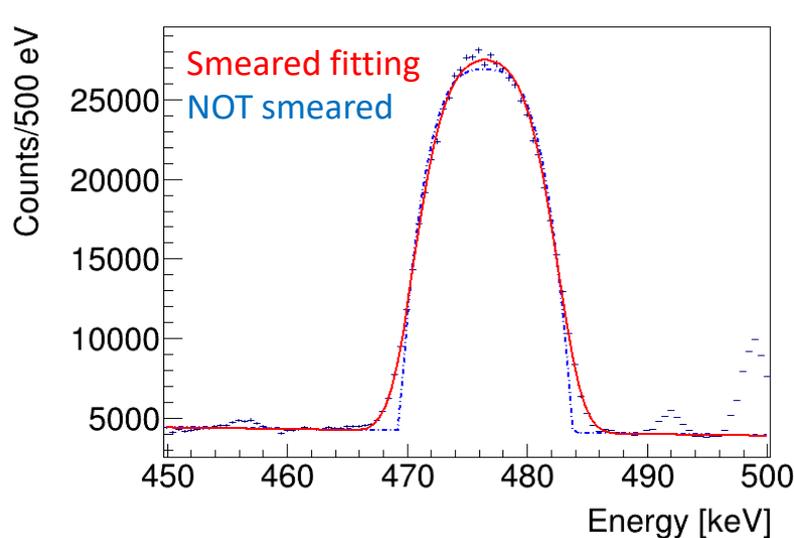
${}^7\text{Li}$ の初速度(=4.6x10⁶m/s)、 ${}^7\text{Li}$ の壊変定数(=9.49x10¹²s⁻¹)



<http://rada.or.jp/database/home4/normal/ht-docs/member/synopsis/040310.html>

B が結合する相手によって共鳴幅が変わる可能性がある

478 keV ガンマ線ピーク幅から得られた Li^* の時定数
ZrB 系、FeB 系で優位な差が観測。
化合物まで含めたホウ素ホウ化物イメージングの可能性を示唆
一方で、D 値の違いから化合物の混合比を説明することは出来ていない



更なる組成比、他化合物 (CrB 等) での
試験を J-PARC 2019B 期中に予定

- ホウ素の三次元可視化技術開発 @ J-PARC/MLF
- CT, PGA 測定を用いたホウ素の二次元/三次元イメージング
- 高速中性子イメージングによるホウ素を多く含む試料のイメージング
- 478 keV ガンマ線ピーク解析から ZrB, FeB 系ホウ化物の識別

今後の展望

- ▷ 種々のホウ化物を使った測定
- ▷ CT, PGA の組み合わせ
- ▷ PGA によるホウ素三次元イメージング
- ▷ PGA による ホウ化物 二次元/三次元イメージング
- ▷

