

2013年12月3～4日 京都大学原子炉実験所
中性子イメージング専門研究会

「 中性子ラジオグラフィ要素技術の
研究・開発・応用、そして夢 」

TAMAKI記念研究所

主宰 玉置 昌義

中性子イメージング技術の基礎と応用

(社) 日本アイソトープ協会 理工学部会
中性子イメージング専門委員会

中性子イメージング技術の基礎と応用 (基礎編第3回)

RADIOISOTOPES, 56, 329-337 (2007)

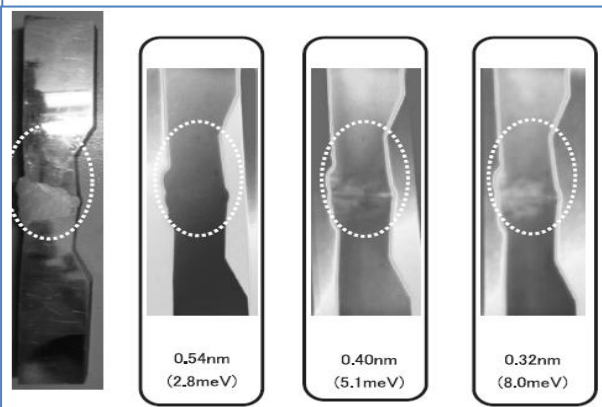
中性子イメージング技術の原理†

玉置昌義

中性子イメージング技術の基礎と応用 (応用編第4回)

中性子イメージングによる材料工学の研究†

玉置昌義



中性子Braggカットオフ波長と(エネルギー)

図13 鉄溶接部(左端)の波長0.54 nm, 0.40 nm
及び0.32 nm(左から右へ)の中性子透視像

中性子イメージングで実時間撮像すると、偏極
中性子のスピンとの相互作用で、電流の流れる
様子を可視化できることも夢ではない。

話 題

0. 日々のつぶやき

1. 研究：中性子スリット

2. 夢：偏極中性子ラジオグラフィ

— — — — — — — — — —

3. 開発：DY-IPイメージングプレート

4. 応用：事故原発燃料の中性子ラジオグラフィ

— — — — — — — — — —

補. 事故原発を眺め続けて2年半余

0. 日々のつぶやき (事故原発の中を見透かしたい)



玉置 昌義

@Dr_Head_TMI

大学定年隠居老学者。生涯現役。TAMAKI記念研究所(TMI)主宰。専門(原子核工学・中性子科学)。研究の場(TMI・旧所属大学・JAEA_Tokai・など)。趣味(自然エネルギー活用・育苗・経営&day-trade・東洋時代劇)。twilog.org/Dr_Head_TMI

愛知県 小牧市

アブストラクト 第45回日本原子力学会中部支部研究発表会 平成25年12月17日(火)~18日(水) 名古屋大学(発表予定)

台風26号および降雨などの境界条件過渡変化に対する福島第一1-3号機の内部状態パラメータの応答

Internal Parameter Responses of TEPCO F1 NPPs No.1-3 on Transient Boundary Condition

due to Typhoon 26 and Rainfall for a month of October 2013

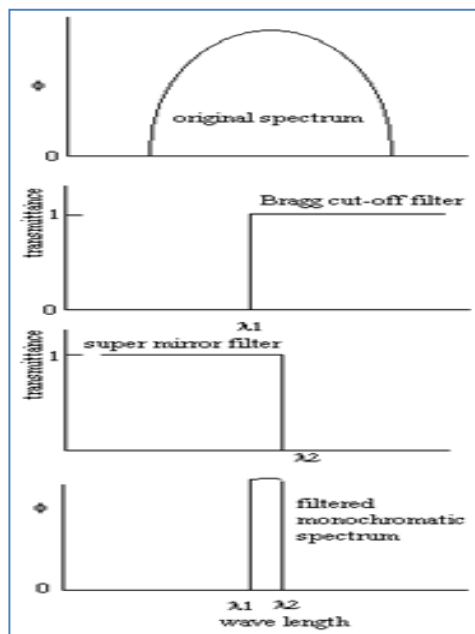
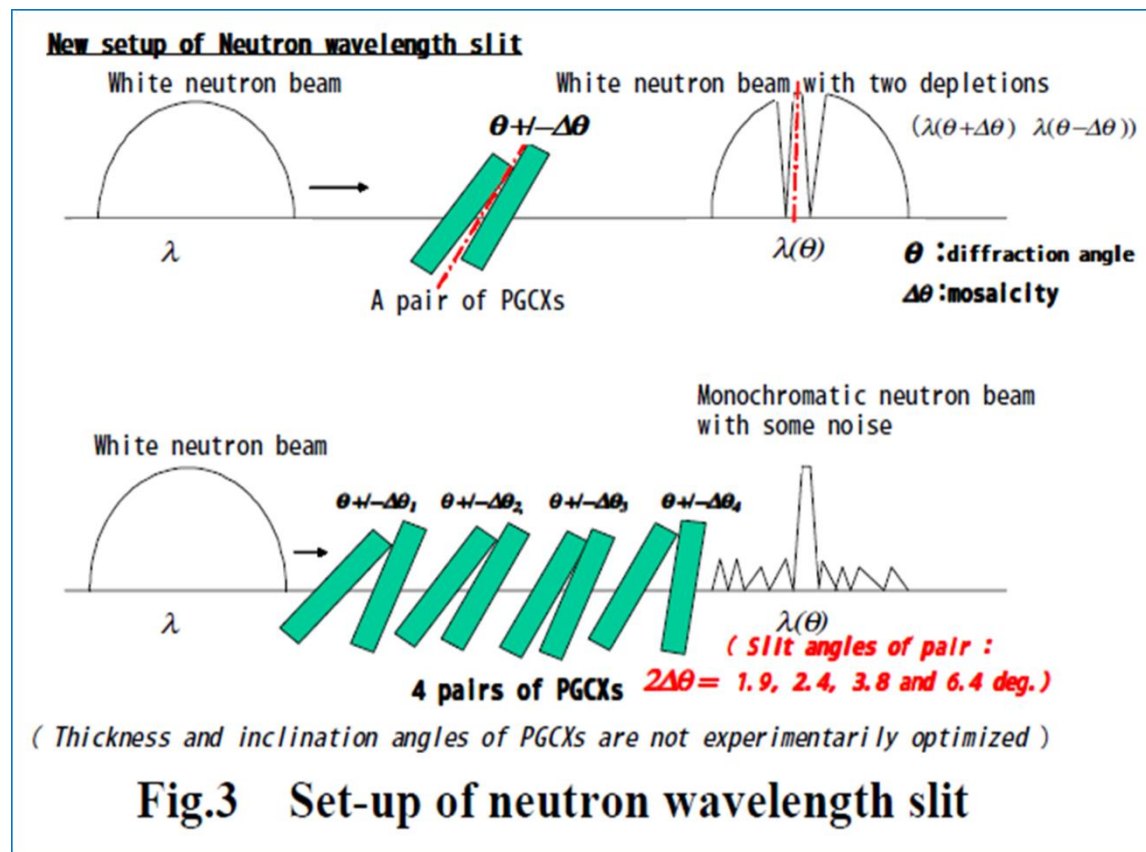
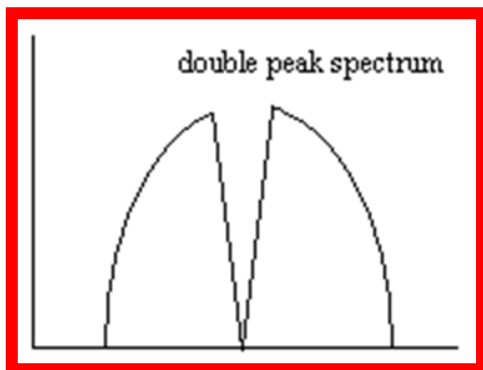
○玉置 昌義 (TMI)

Masayoshi Tamaki (TAMAKI Memorial Institute)

1. M. Tamaki, "Lesson and Learn from "Fukushima Daiichi" 100 Day's Tweets", Global 2011 (Dec. 2011).
2. M. Tamaki, "For the Non-destructive Visualization of the Irradiated and Failed Fuels and Materials from the Fukushima-1 NPP using the Neutron Imaging by the γ -insensitive Dy-doped Imaging Plate", Global 2011 (Dec. 2011).
3. 玉置昌義、"Dr_Head_TMIの福島第一原発に関するツイートのまとめ(1)(2)"、原子力学会中部支部第43・44回研究発表会(2011, 2012)。

1. 研究：中性子スリット (CNRF冷中性子ラジオグラフィの行き詰まりから)

スペクトルシフト(ハードニング・ソフトニング)→BCO単色化



黒鉛の単結晶に行きつくまでの迷走・・・モザイク度

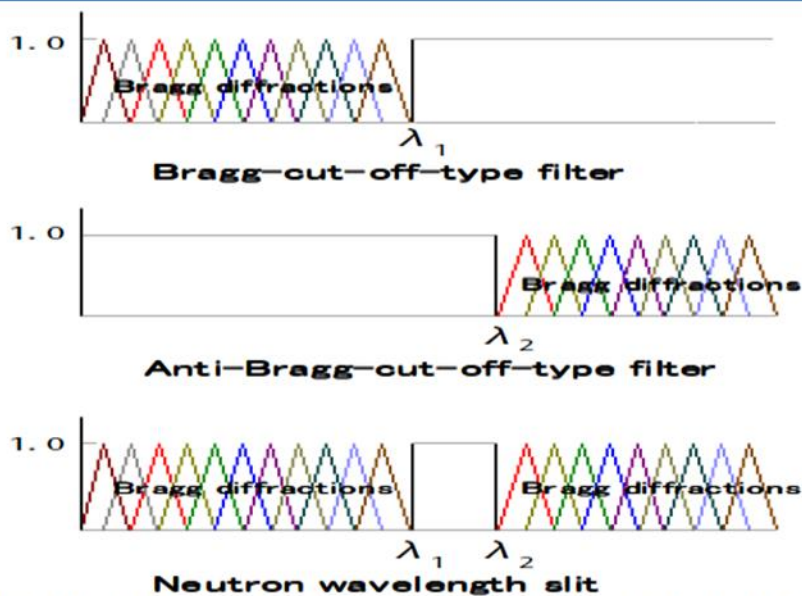


Fig.1 Schematic concept of neutron wavelength slit by neutron Bragg's diffraction

Preliminary result

Measuring neutron transmittance of steel using neutron beam in a range from 0.3nm to 0.6nm, apparent total neutron macroscopic cross-sections of steel around Bragg-cut-off(0.4nm) were evaluated.

Averaged neutron wavelength / nm	apparent cross-section of Fe / cm ⁻¹
0.3	1.2
0.4	1.1
0.45	1.0
0.5	0.95
0.55	1.0
0.6	1.0

Preliminary verification of neutron wavelength slit at JRR-3M, JAEA

Developed wavelength slit

Neutron image of steel plate using neutron wavelength slit

Four graphite single crystals
Four graphite poly-crystals
Fe 10mm thickness

ホワイトスペクトルに限られた結晶数の壁

松下電工の開発者の協力が出発点

Work partially performed at SINQ
Proposal-number: 20061041
Instruments: ICON

Energy selective imaging using pyrolytic single crystals(Neutron Wavelength Slit)

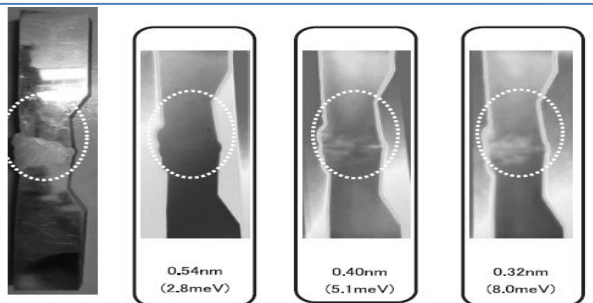
M. Tamaki¹, G. Kuehne², G. Frei² and E. Lehmann²

¹TAMAKI Memorial Institute, Kuboshin-machi 2, J-485-0006 Komaki, Japan

²SINQ PSI, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland

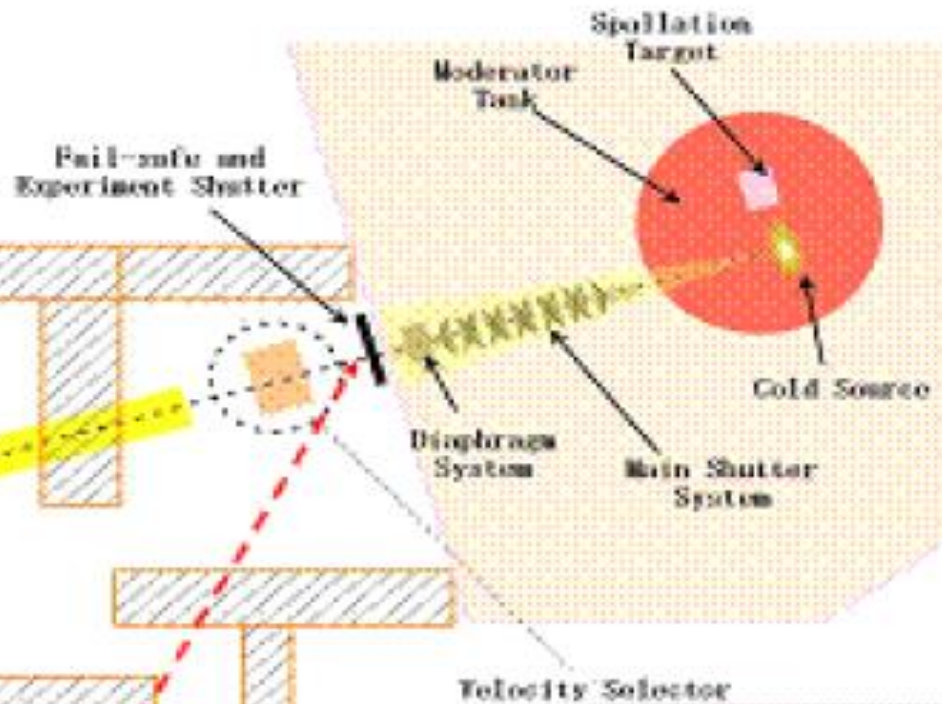
Neutron wavelength slit is a combination of various mosaic single crystals. Through Bragg-cut-off-type and anti-Bragg-cut-off-type filters, the cold neutron beam having white spectrum is changed to a narrow-band beam. Fundamental test and a preliminary application were conducted using the cold neutron beams of JRR-3M, JAEA, Japan and SINQ, PSI, Switzerland.

第1回実験 (スリットなし)

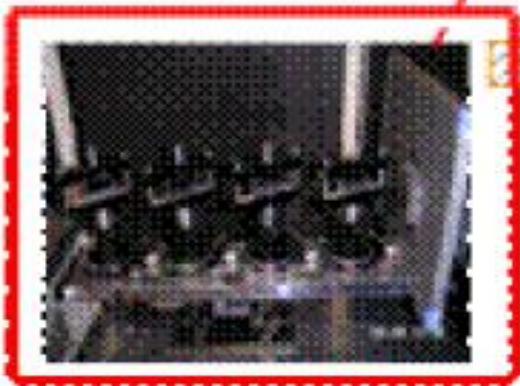


中性子Braggカットオフ波長と(エネルギー)

図 13 鉄溶接部 (左端) の波長 0.54 nm, 0.40 nm 及び 0.32 nm (左から右へ) の中性子透視像



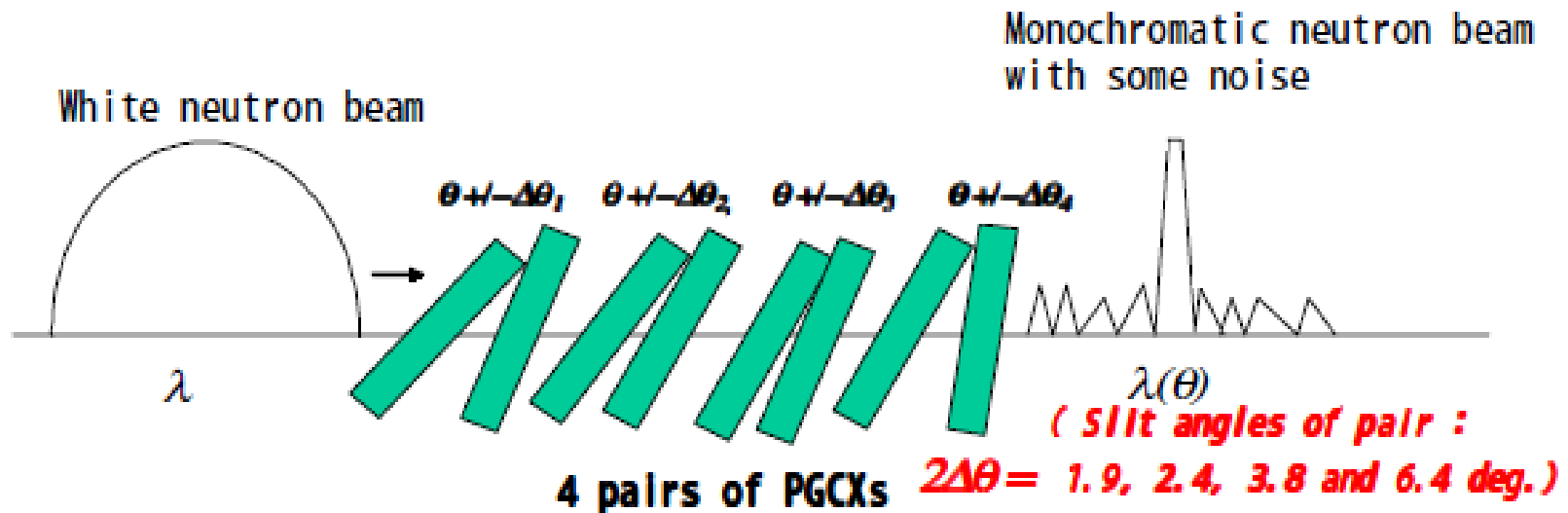
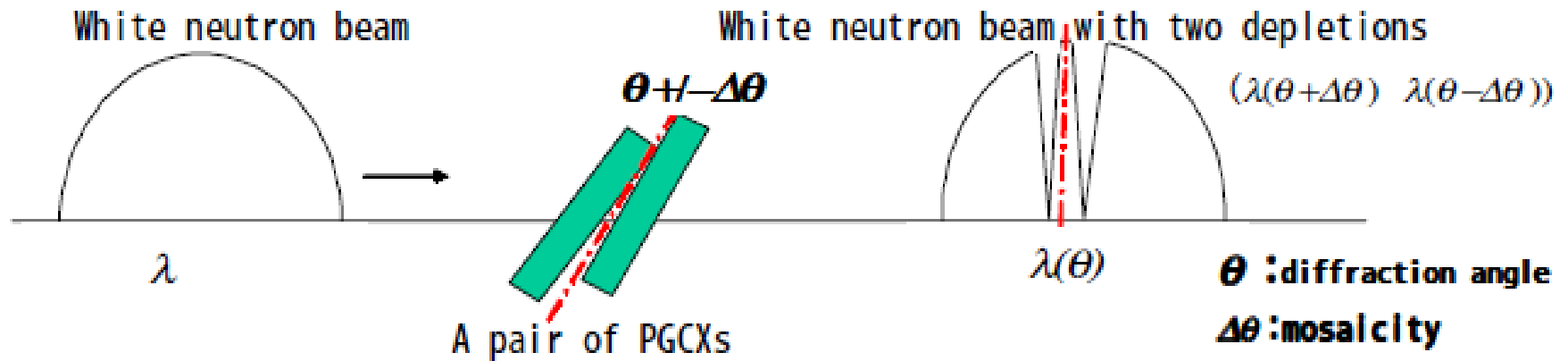
第2回実験 (スリット持ち込み)



Developed wavelength slit

Fig.2 Neutron wavelength slit at ICON

New setup of Neutron wavelength slit

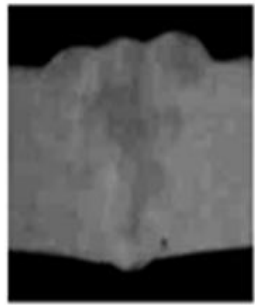


(Thickness and inclination angles of PGXs are not experimentarily optimized)

Fig.3 Set-up of neutron wavelength slit

Neutron transmission imaging using wave length slit

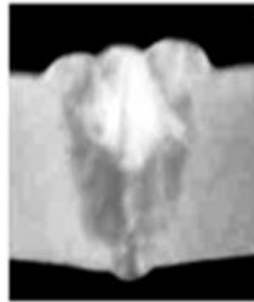
Welded Fe



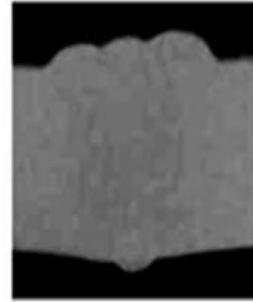
3_0A
(Neutron
wavelength)



3_5A



4_0A
(Bragg-cut-off wavelength)



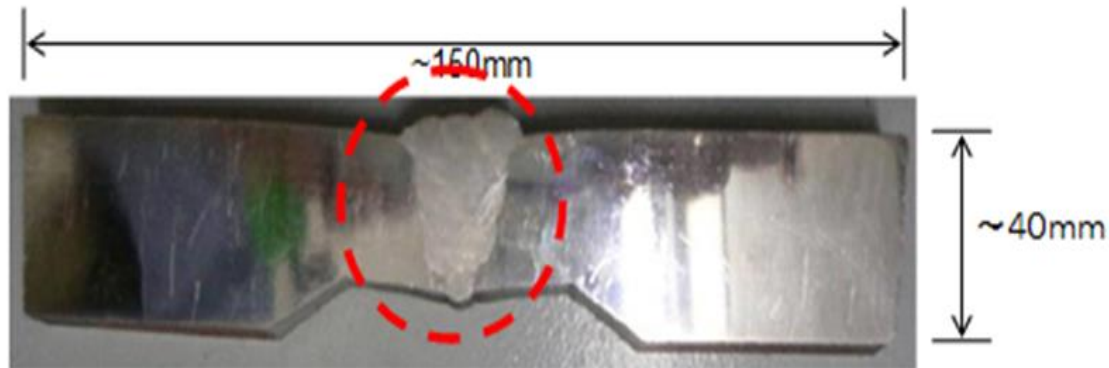
4_5A



5_0A

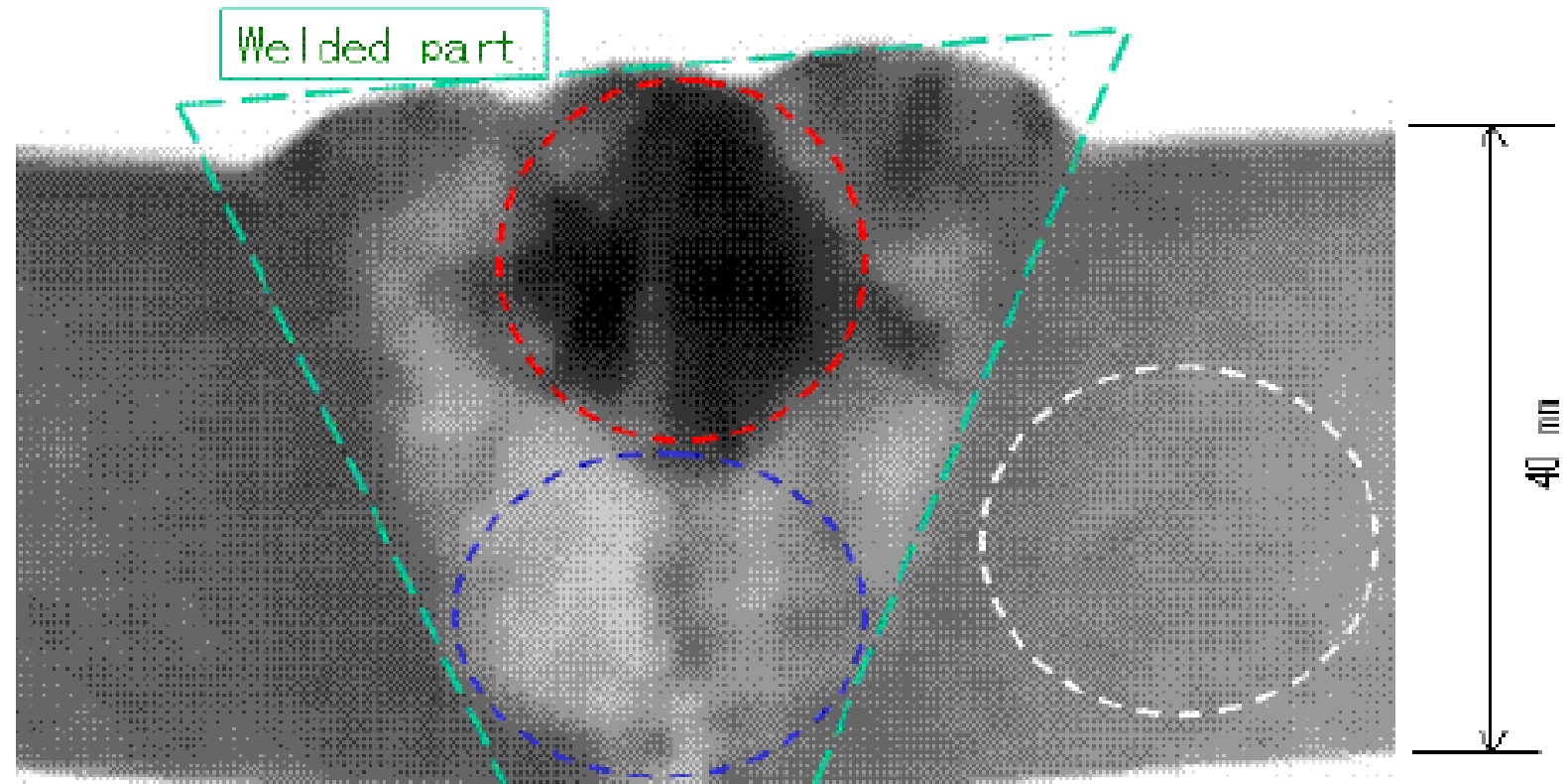


5_5A



Welded part (thickness 11mm)

Typical monochromatic neutron imaging of welded part of steel



Neutron imaging of welded steel (1mm thickness) using 0.4 ± 0.01 nm monochromatic neutron beam (upper central black part: crystal grains predominantly oriented by Bragg-cut-off plane, lower central light gray part non-Bragg-cut-off planes, right and left middle gray parts: isotropically oriented crystal grains)

Fig.4 Image of crystallographic anisotropy of welded part of iron

~6年後

A new transmission based monochromator for energy-selective imaging at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

¹ Paul Scherrer Institut, Neutron Imaging and Activation Group, CH-5232, Switzerland

² Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, NXMM laboratory, IMX, CH-1015, Switzerland

³ Graduate School of Engineering, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan

Abstract

A new type of monochromator has been developed for energy-selective neutron imaging at continuous sources. It combines the use of a mechanical neutron velocity selector with pyrolytic graphite crystals of different mosaicity to provide flexible transmitted beam spectrum shaping down to 2% monochromaticity. There is intrinsically no higher order contamination of the spectrum and working with the transmitted beam, the beam properties (e.g. collimation) are not compromised.

Keywords:

Energy-selective neutron imaging, neutron imaging,
monochromator, velocity selector, filter

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

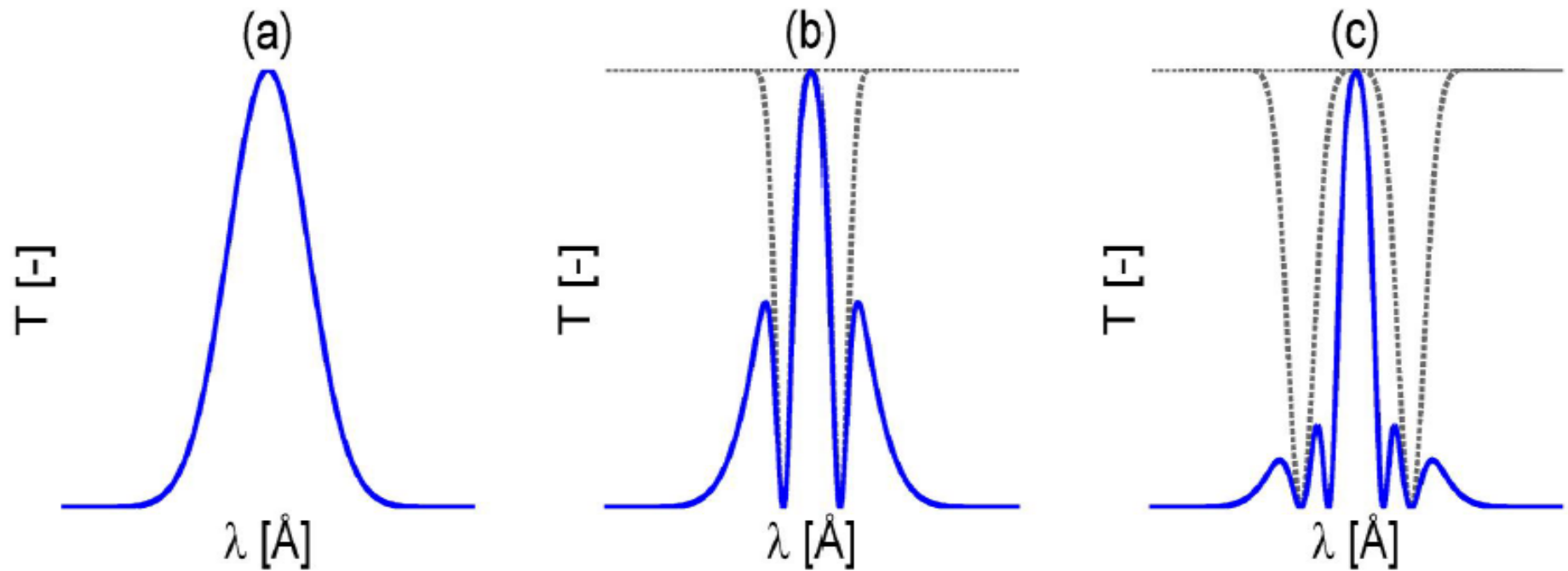


FIG. 1. TESI principle: starting from the transmission spectrum of the mechanical velocity selector (a), a first crystal pair of low mosaicity is added (b) after which a second crystal pair of higher mosaicity is added to lower the side lobes (c). The total transmission spectrum is indicated by the solid blue line and the crystal transmission spectra by the dashed gray one.

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹



Developed wavelength slit

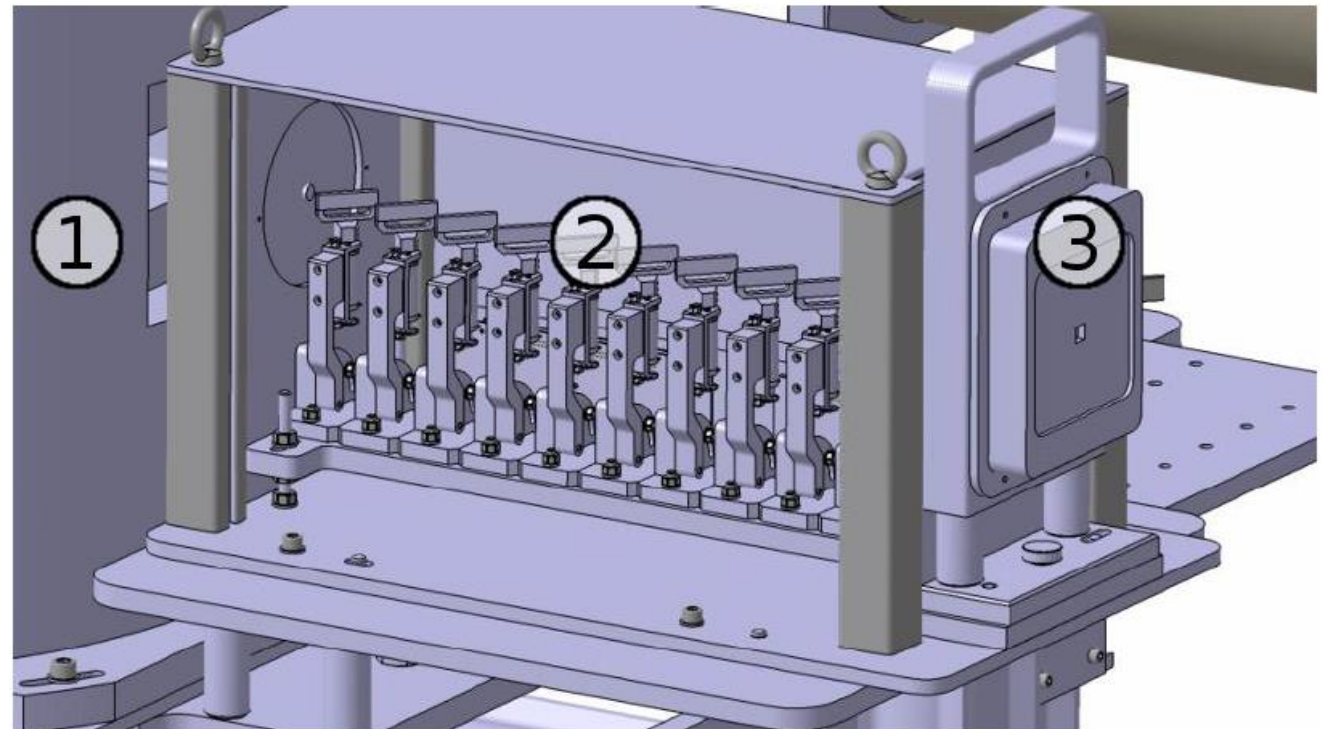


FIG.2. TESI device installed at the ICON beamline, in front of the mechanical velocity selector (1), showing crystals (2) and shielding (3). Neutrons come in from the right.

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

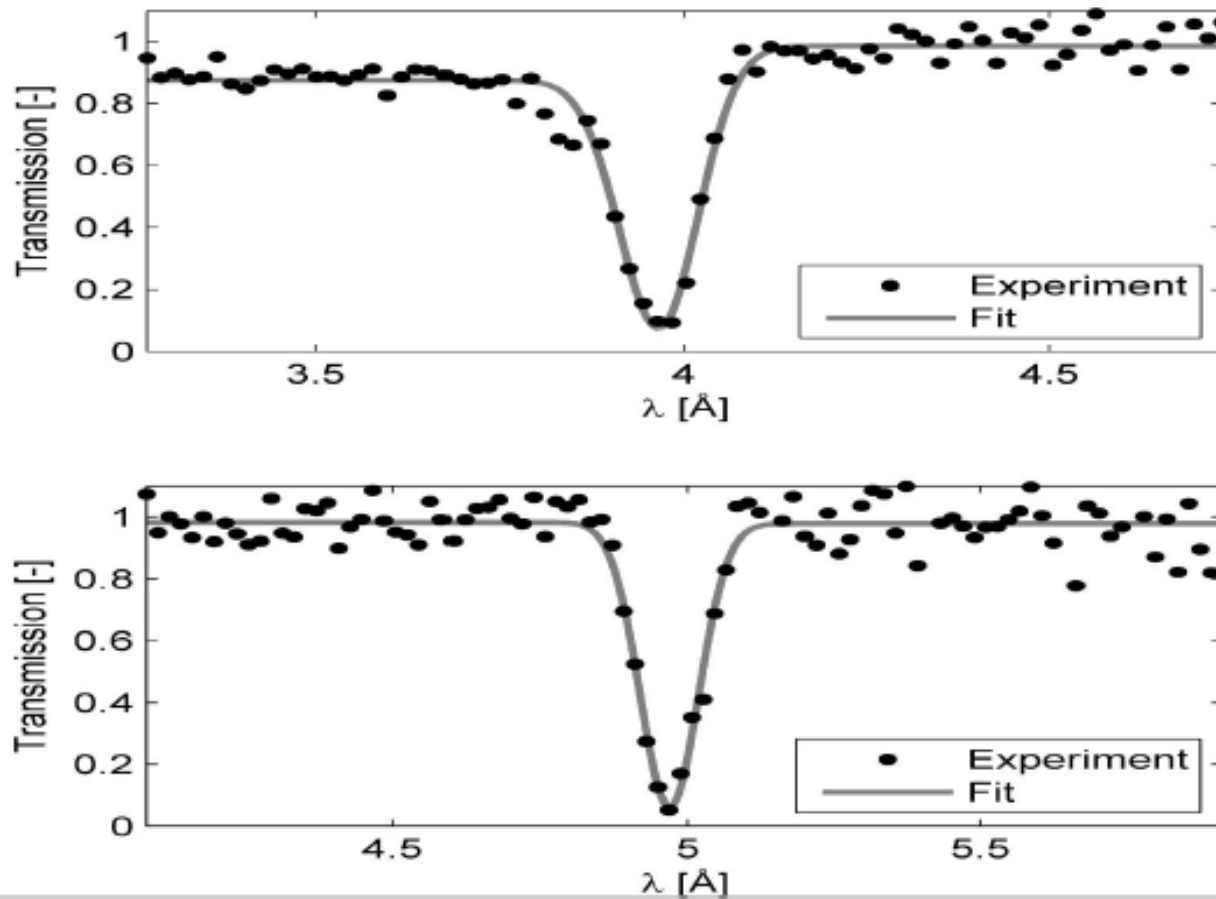


FIG. 3. Recorded and fitted transmission profile of crystal 2, set for diffraction at $\lambda_{\text{set}}=4\text{\AA}$ (top) and 5\AA (bottom).

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

TABLE I. Experimentally determined mosaicities of the
used pyrolythic graphite crystals.

Crystal No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\theta$ [°]	0.4	0.5	0.4	0.4	1.1	1.0	1.7	1.7

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

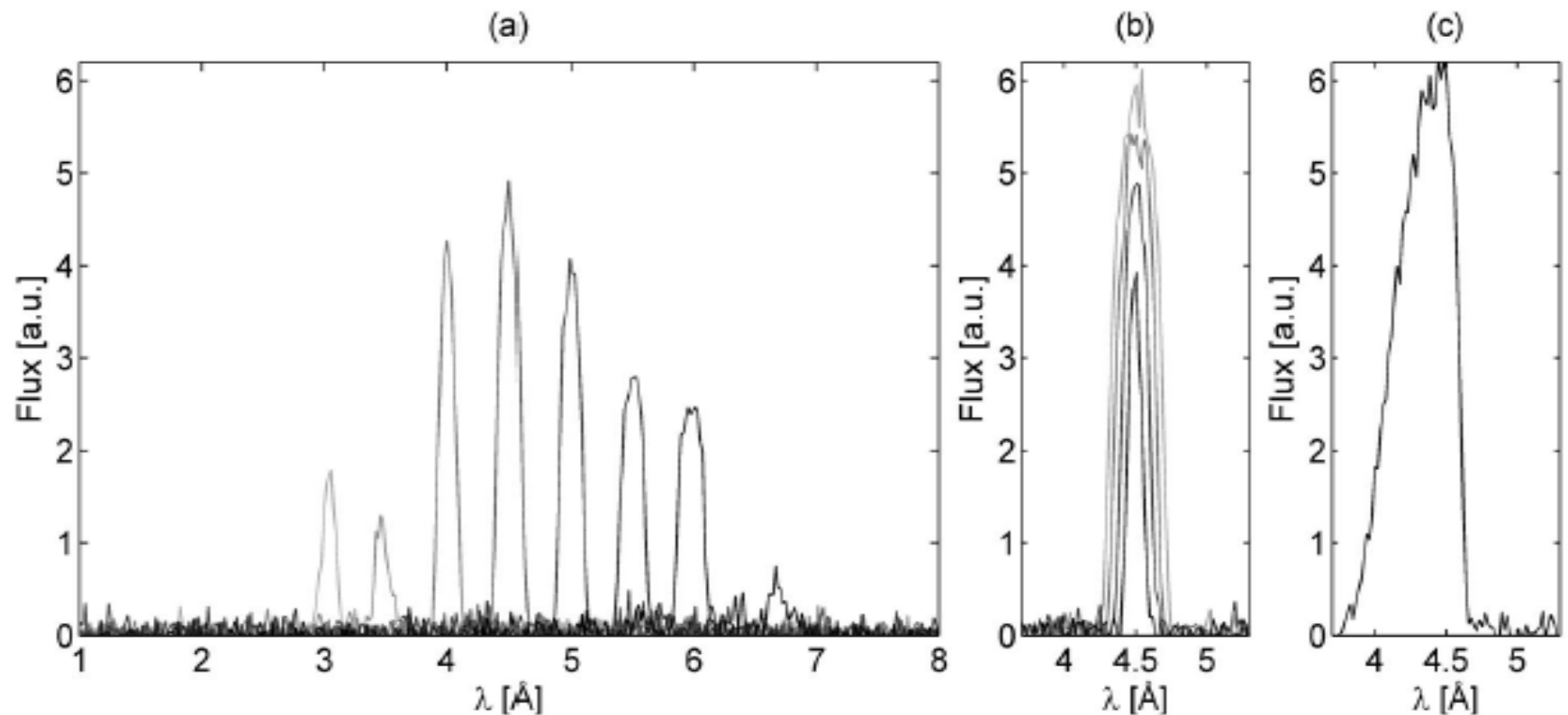


FIG. 4. Beam spectra for an energy scan from 3 Å to 6 Å per 0.5 Å (a), for 4 different set monochromaticities (b) and for an asymmetric peak profile (c).

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

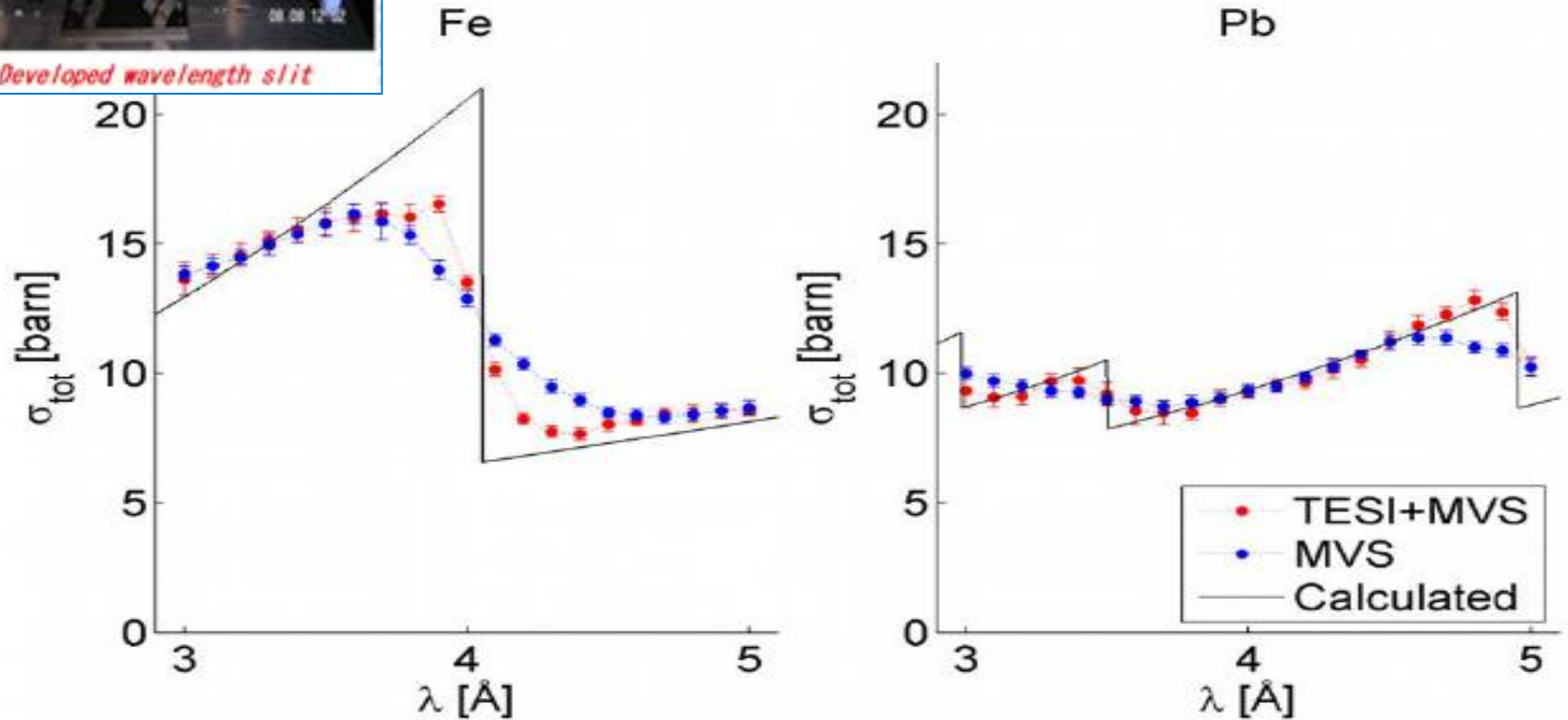


FIG. 6. Wavelength-dependent cross-section of an iron (left) and lead (right) plate measured with and without the TESI insert and compared to theory.

A new transmission based monochromator
for energy-selective imaging
at the ICON beamline

S. Peetermans^{1,2,a)}, M. Tamaki^{3,b)}, L. Josic^{1,c)}, S. Hartmann^{1,c)}, M.
Morgano¹, A. Kaestner¹ and E. H. Lehmann¹

結晶サイズ
(10x40x5mm)



(40x80x5mm)

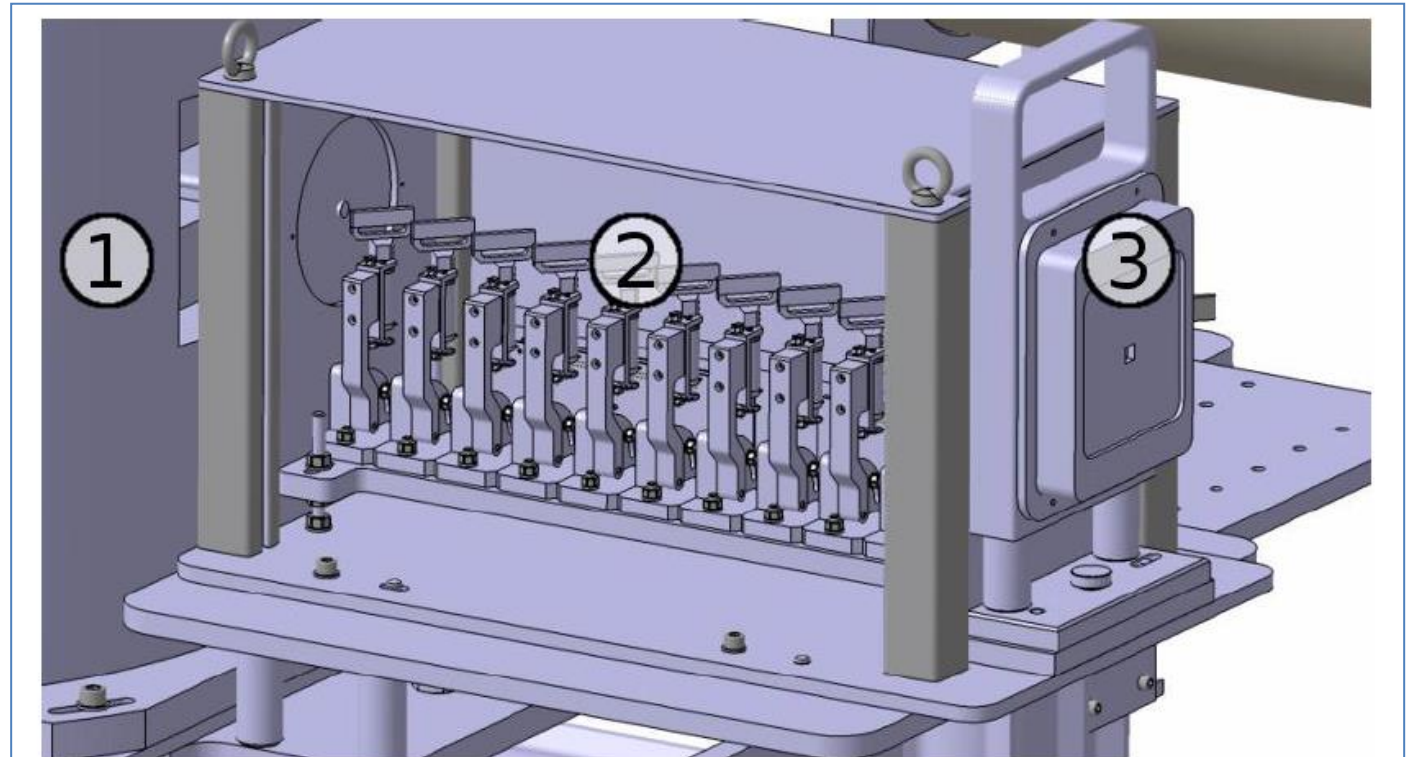


FIG.2. TESI device installed at the ICON beamline, in front of the mechanical velocity selector (1), showing crystals (2) and shielding (3). Neutrons come in from the right.

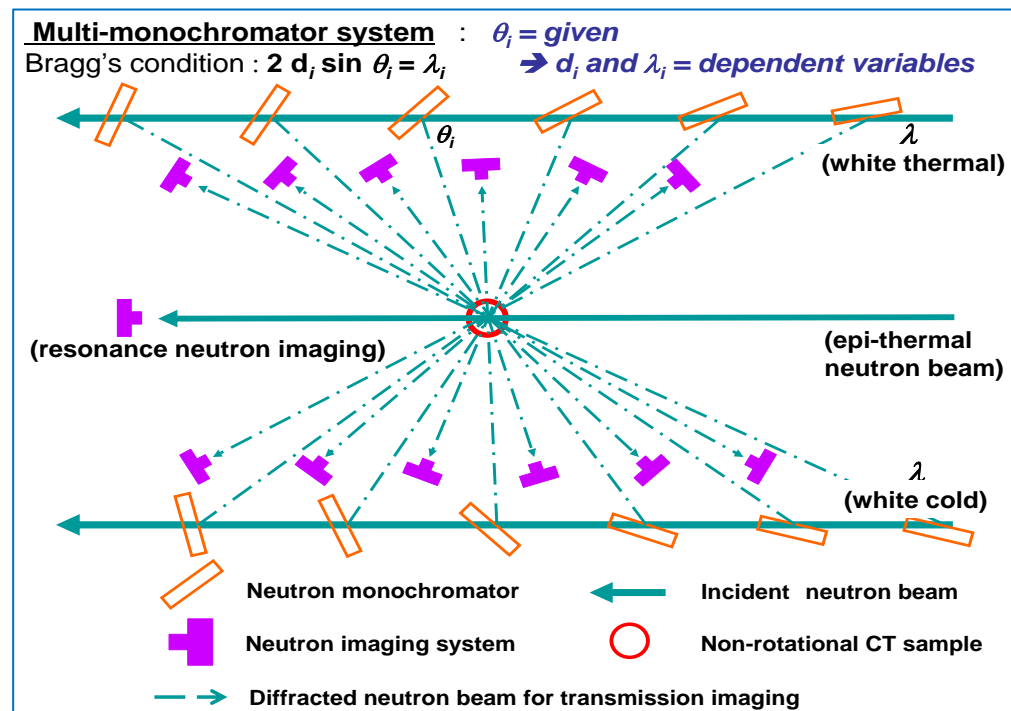
～(単結晶のCNCT @ HMI)～定年後

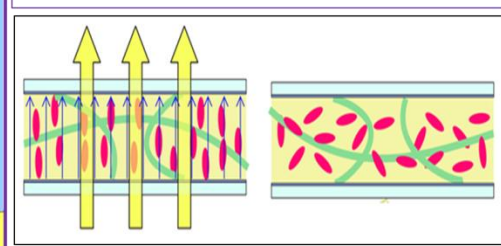
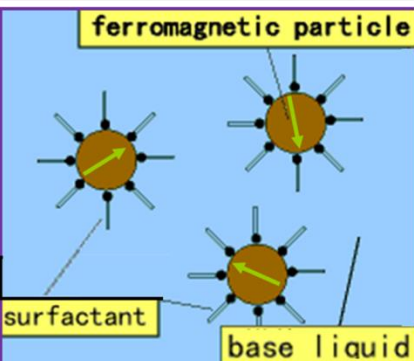
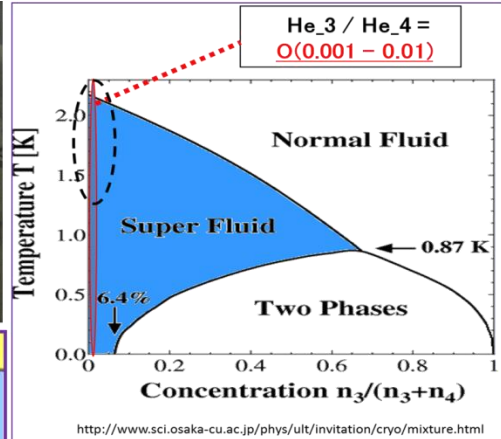
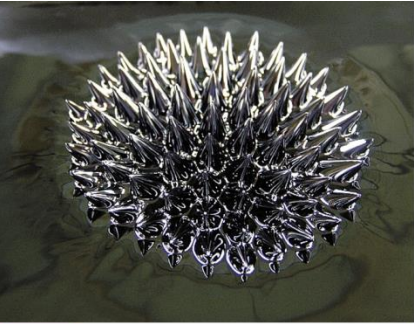
卒業生に協力を得てME法の再構成ソフト

多結晶[溶接部)のCTの解析には限界

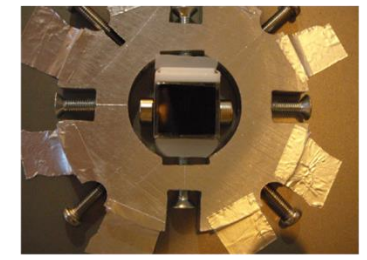
2. 夢 : 偏極中性子ラジオグラフィ

(要素光学素子・擬似CTの開発に挑戦中)

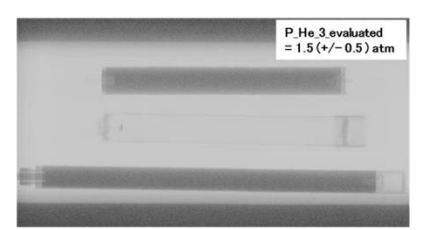




Sample Photos and their Neutron Imaging



Magnetic Fluid

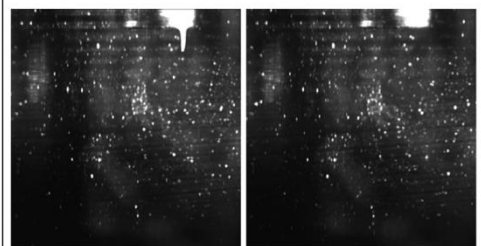


He-3 Neutron Detector

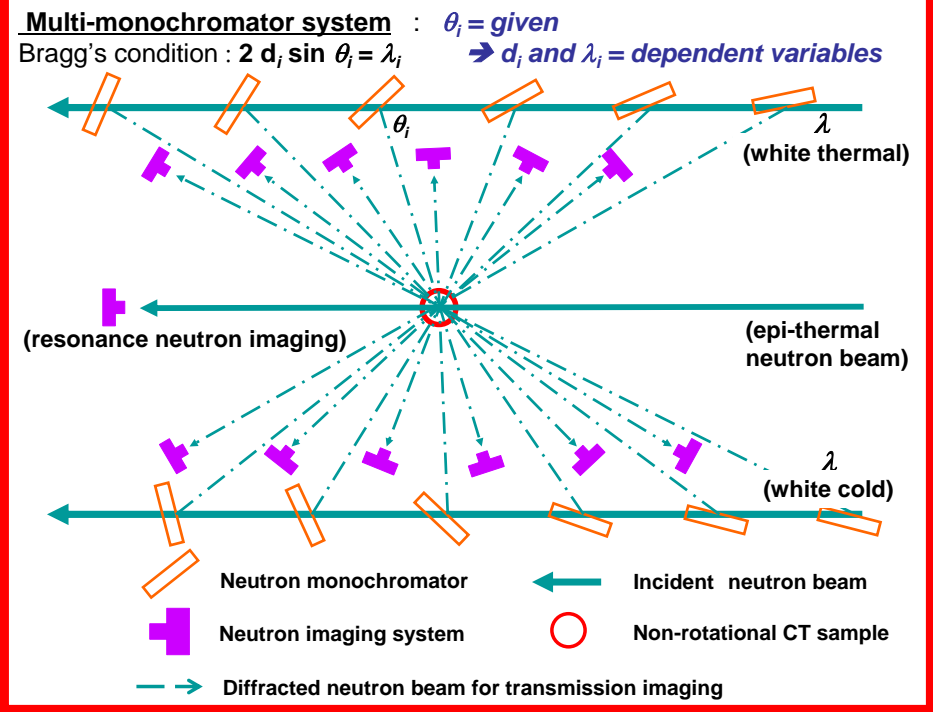
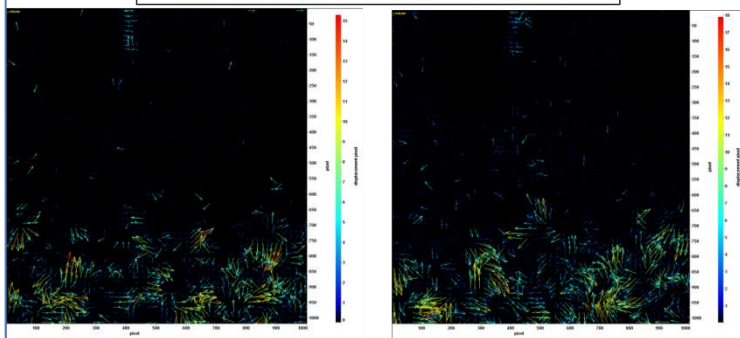
P-He 3 evaluated = 1.5 (+/- 0.5) atm

20110311 BIG_EARTHQUAKE→FUKUSHIMA_NPPACCIDENT→TOKAI JAEA STOP →No NEUTRON

Visualization of Hydrogen Particle in He-4 Super-fluid by YAG-LASER



A couple of images after Hydrogen Injection into He-4 Liquid



(地震・原発事故・研究炉停止)

テレビにくぎづけ

2011・03・11-14

2013・03・15
(共同研究員)
2013・03・16

4号機プールの水位低下 簡単な計算



Kantei_Saigai さん

使用済み燃料の崩壊熱によるプール水位低下は一日70cm程度です。10日で燃料が水面から顔を出します。あと5日足らずの可能性がありますが。高層ビル用消防車でホウ酸入り真水注入は使用済み燃料崩壊熱相当蒸発の毎秒1リットル程度です。腐食性海水はだめです。

Dr_Head_TMI 2011-03-16 19:49:38

アブストラクト 第45回日本原子力学会中部支部研究発表会 平成25年12月17日(火)~18日(水) 名古屋大学(発表予定)

台風26号および降雨などの境界条件過渡変化に対する福島第一1-3号機の内部状態パラメータの応答

Internal Parameter Responses of TEPCO F1 NPPs No.1-3 on Transient Boundary Condition
due to Typhoon 26 and Rainfall for a month of October 2013

○玉置 昌義 (TMI)

Masayoshi Tamaki (TAMAKI Memorial Institute)

1. M. Tamaki, "Lesson and Learn from "Fukushima Daiichi" 100 Day's Tweets", Global 2011 (Dec. 2011).
2. M. Tamaki, "For the Non-destructive Visualization of the Irradiated and Failed Fuels and Materials from the Fukushima-1 NPP using the Neutron Imaging by the γ -insensitive Dy-doped Imaging Plate", Global 2011 (Dec. 2011).
3. 玉置昌義、"Dr_Head_TMI の福島第一原発に関するツイートのまとめ(1)(2)"、原子力学会中部支部第43・44回研究発表会(2011, 2012)。

研究と事故対策

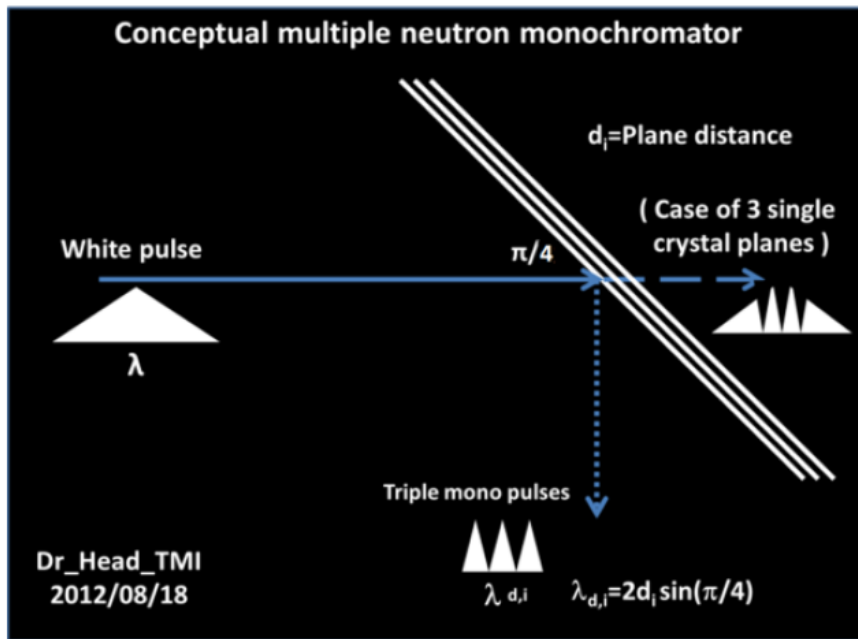


図3. 3重中性子鏡による実験光学構成

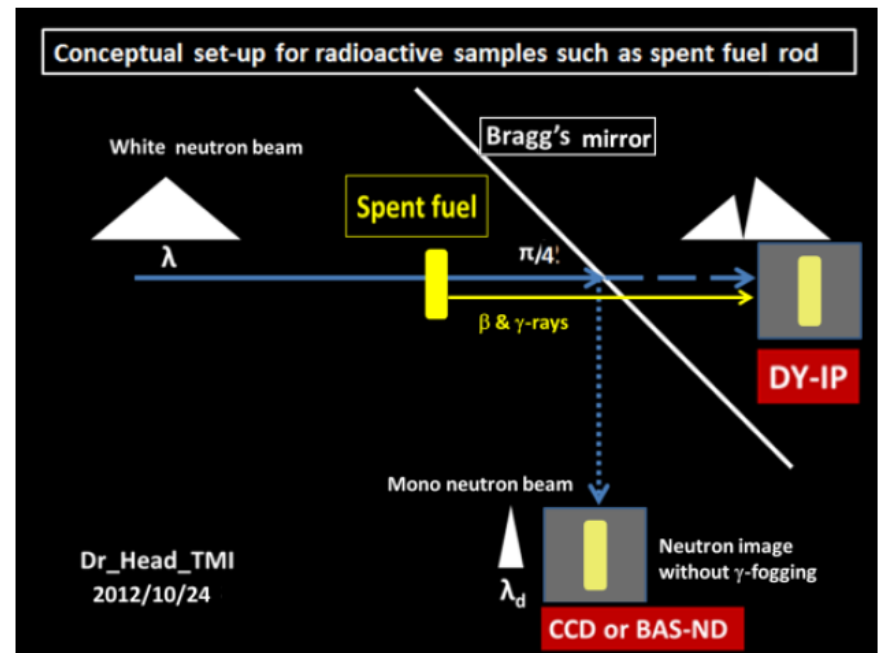


図2. 高放射能体の中性子画像化装置配置

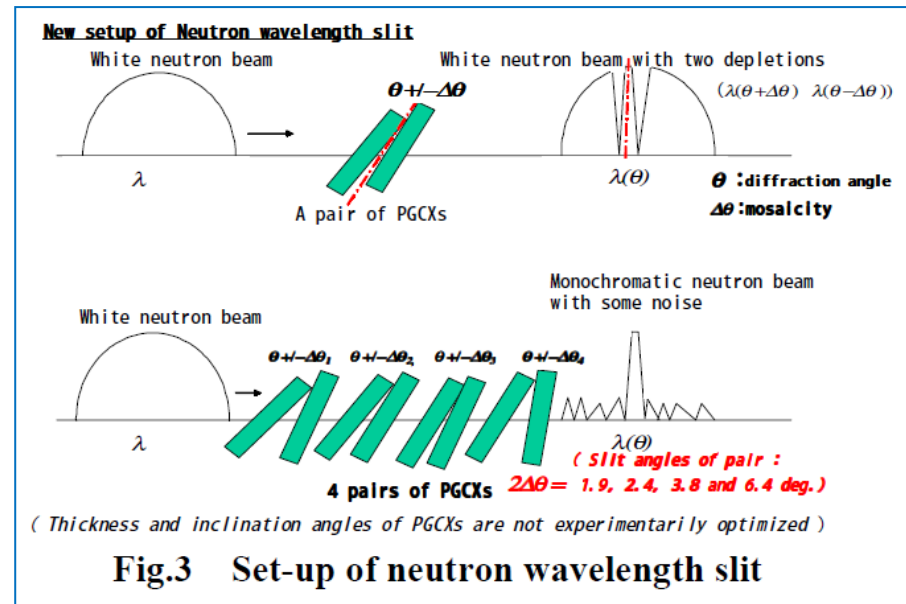
表1. 中性子鏡用材料と波長特性

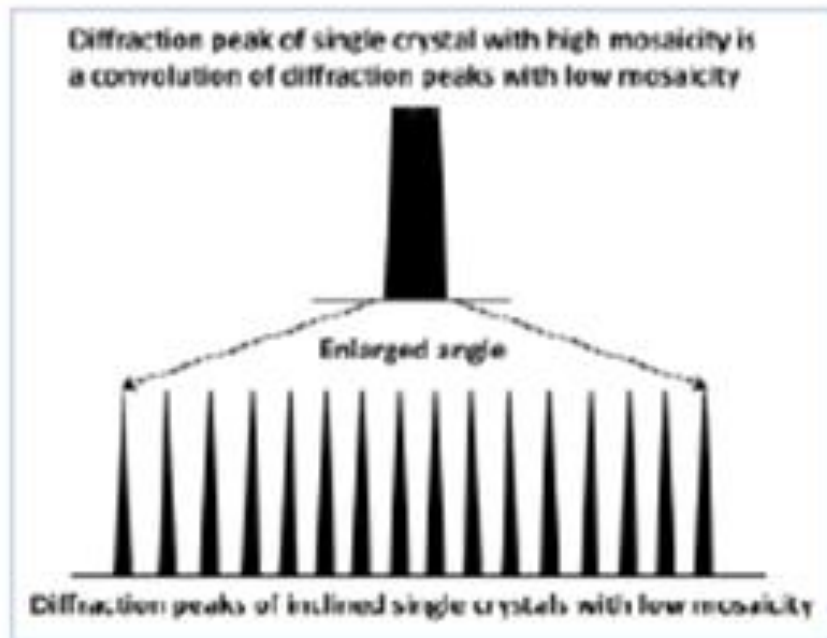
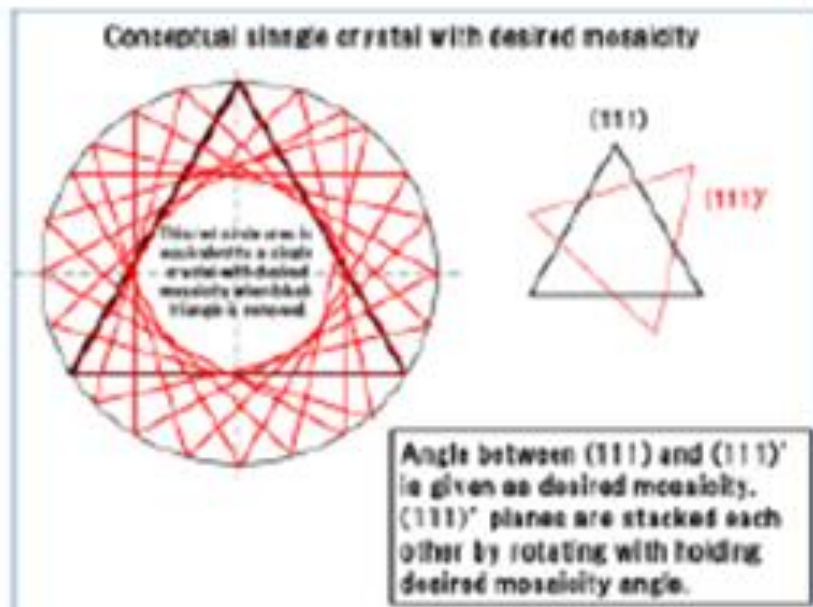
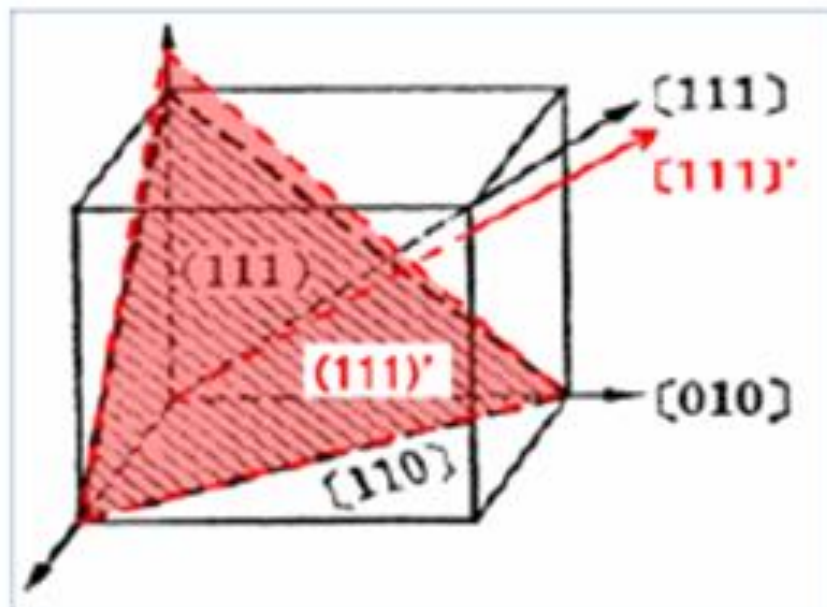
Single crystal planes for neutron mirror

d space(Å)	Element/hkl
6.712	GSX/001
3.356	GSX/002
3.278	Ge/111
3.136	Si/111
2.007	Ge/220
1.92	Si/220
1.711	Ge/311
1.678	GSX/004
1.637	Si/311
1.419	Ge/004
1.358	Si/004

TABLE I. Experimentally determined mosaicities of the used pyrolytic graphite crystals.

Crystal No.	1	2	3	4	5	6	7	8
$\Delta\theta$ [°]	0.4	0.5	0.4	0.4	1.1	1.0	1.7	1.7





- Test single crystals of Si(111) with nominal mosaicity from 0.1 to 1.0 degrees
- Sample 01 : Si(111) with mosaicity of 0.1 degree
 - Sample 02 : Si(111) with mosaicity of 0.2 degrees
 - Sample 04 : Si(111) with mosaicity of 0.4 degrees
 - Sample 06 : Si(111) with mosaicity of 0.6 degrees
 - Sample 08 : Si(111) with mosaicity of 0.8 degree
 - Sample 10 : Si(111) with mosaicity of 1.0 degree

図 4. 多重中性子鏡によるモザイク構成

(中性子ビーム・タイム待ち
・
時代をさかのぼって夢を)

3. 開発：DY-IPイメージングプレート (照射後核燃料のNRへの思い)

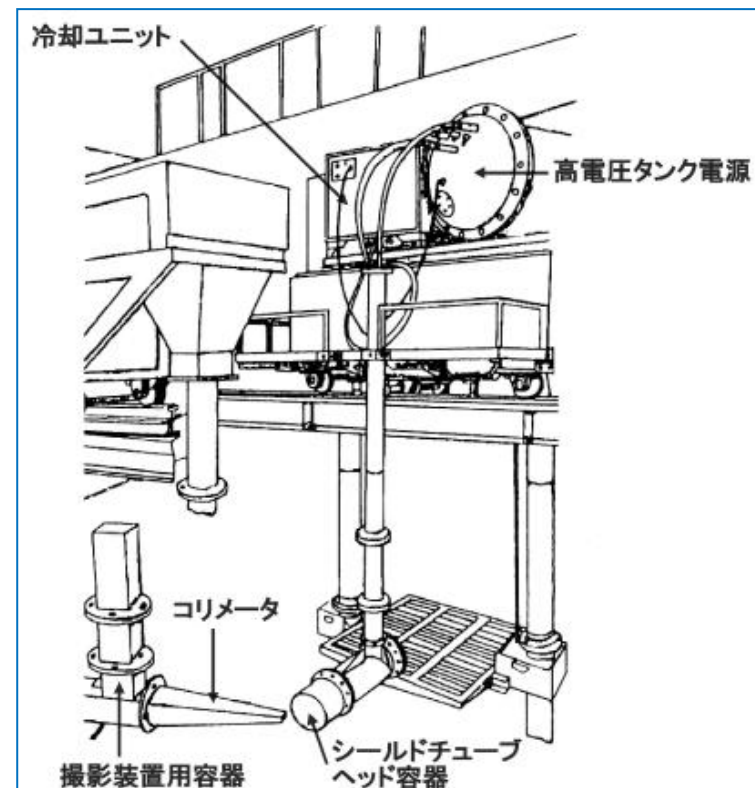
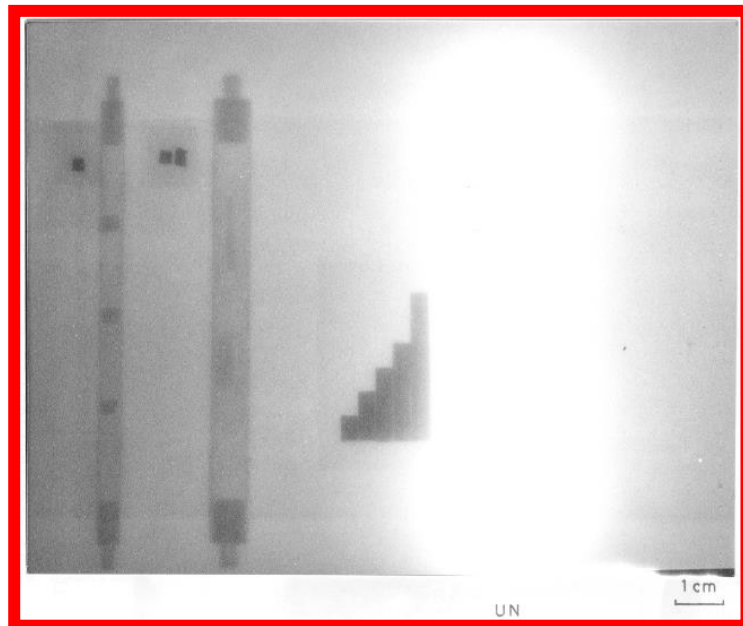


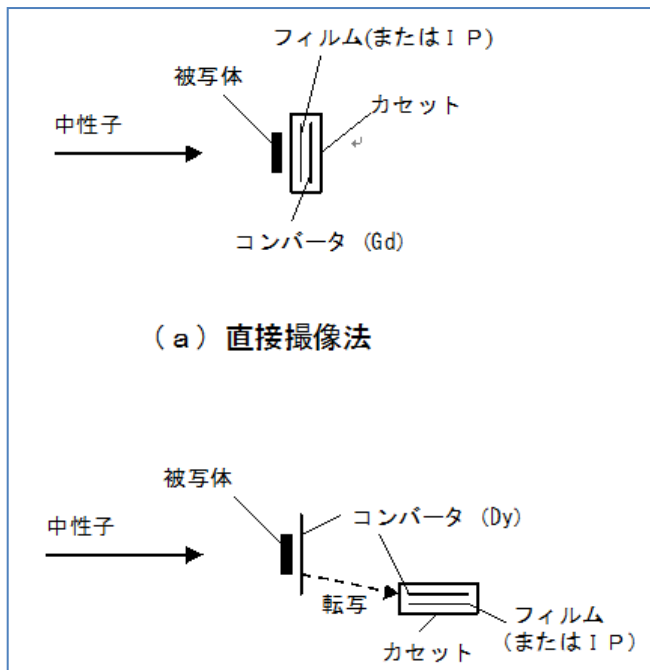
図 15 ホットラボプールに設置された中性子ラジオグラフィ装置(名古屋大学)⁵⁾(立体図)

BAS-ND

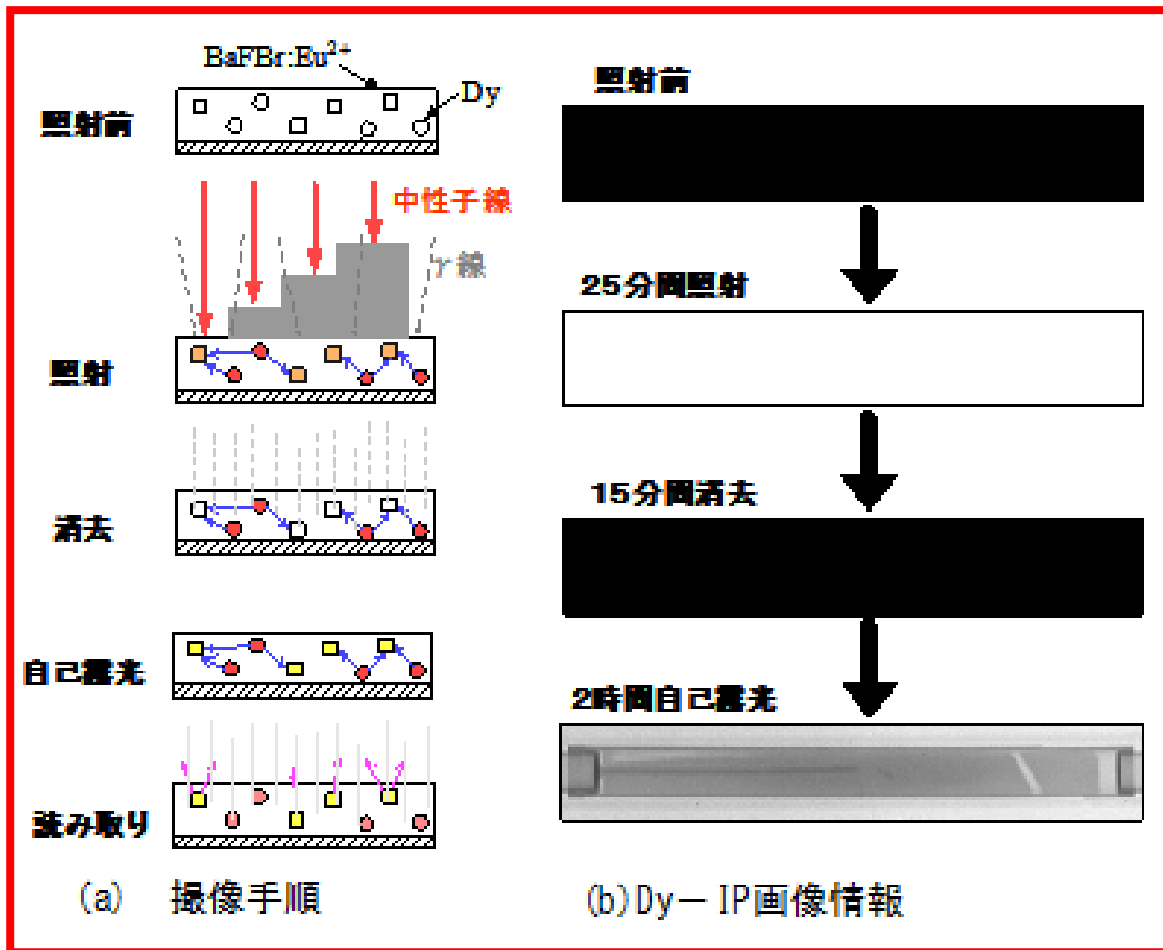
から

DY-IPへ

富士フィルムの協力



(a) 直接撮像法



(a) 撮像手順

(b) Dy-IP画像情報

ガンマ線不感式中性子イメージングプレート (Dy-IP)

Dy-IP for Neutron Imaging for Nuclear Materials under Realistic Conditions

名古屋大学 (工)

玉置 昌義

Masayoshi TAMAKI

核燃料照射後試験を念頭に、 γ 線不感処理式イメージングプレートの原理を提案した。酸化ジスプロシウム(Dy₂O₃)を揮発性蛍光体(PSL体)に混ぜ込んだイメージングプレート(Dy-IP)を製作し、機能の検証、特性の評価、最適仕様の確定などを進めた。開発したDy-IPを、照射後の核燃料、スポレーションターゲット、核融合材料の非破壊透視検査に実用的に応用した。

要旨: 照射後非破壊試験、中性子イメージング、 γ 線不感処理、Dy-IP

緒言: 中性子イメージング技術を科学研究手段として高度化するために、散乱中性子除去および γ 線カブリ評価に関する手法の確立につづいて、更なる中性子イメージング技術の高度化と実用的応用のために、核燃料の照射後試験に使用可能な γ 線不感式撮像法の開発に取り組んだ。

背景: BAS-ND(酸化ガドリニウム入りIP)の開発と商品化は中性子科学研究に関わるイメージング手法に飛躍的な高度化をもたらした。しかし、実験場におけるIP画像の γ 線によるカブリは、BAS-NDにとって避けられない解決すべき課題であった(図1a)。ジスプロシウム(Dy)とX線用イメージングプレート(XIP)を組み合わせる間接中性子イメージング法(図1b)でこの問題を克服し、マルチチャンネルコリメータ(MC)による散乱中性子除去法を併用して科学研究への応用に必要とされる定量的な確保を検証した。この間接撮像手法を高度化するために、DyをXIP内に混ぜ込むことで、 γ 線不感処理式中性子イメージングの新概念を提案した。

原理: 中性子イメージングデバイスとしてのDy入りIP(Dy-IP)による撮像原理を示す(図2左)。中性子イメージング過程において、照射中性子線量に比例してDy-IP中のDyが放射化されると同時に、PSL体自身も γ 線やベータ線に感光する。時には飽和して画像情報を失う。そこで中性子照射直後に可視光線を当ててIPの潜像を一旦消去する。続いて遮光した状態で放射化したDyからの β 線によってIPを自己露光させ、二次元潜像を形成させる。最後にIP読み取り器でデジタル画像化し、画像解析を行う。

検証: 揮発性蛍光体(PSL体: BaFBr:Eu)とDy₂O₃を等モル比に混ぜたDy-IPを試作し、JRR-3M TRNFにおいて、標準的には、1-10秒間照射、5-15分間可視光下 γ 線カブリ除去、遮光下1-24時間自己露光後、IP読み取り・画像解析を行って中性子透視画像が得られることを検証した(1)。Dy/XIPの組み合わせの間接撮像法に比べてより良好な中性子イメージが得られた。更にMCを併用して散乱中性子の影響を取り除くことによって高い定量性が確保できることを検証した。

評価: Dy-IPの感度・空間分解能の蛍光体層厚さおよび(Dy₂O₃/PSL体)混合比依存性を明らかにした(図3)。さらにGd₂O₃層をPSL体層に裏打ちしてIP後方からの散乱中性子の影響を除去することで、更により定量的な確保できることを明らかにした。PSL体にDy₂O₃を40%モル%混合した150 μ m厚さの蛍光体層と100 μ m厚さのGd₂O₃後方散乱中性子吸収体層からなるDy-IPが最適仕様である。

応用: (1) スイス ポールシェラー研究所(PSI)の中性子イメージング施設NEUTRAにて、照射後核燃料ピンの中性子イメージングに応用し(図2b)、燃料ペレット・ジルカロイ被覆管の寸法、ジルカロイ被覆管壁の水素析出物、燃料濃縮度(U-235換算)の評価を行った(図4)。(2) PSI中性子源SINQや世界各国のスポレーションターゲット開発のために、鉛、水銀などの照射後ターゲットの中性子イメージングにDy-IPを応用した(図5)。現在、次世代ターゲットの照射後試験を進めている。また、照射後核融合炉材料の中性子透視試験にもDy-IPを応用した。

結言: 開発したDy-IPは定量的な確保できる高性能中性子イメージングデバイスであり、核燃料、核融合材料およびスポレーションターゲットの照射後非破壊透視検査に有用であることを確認した。

謝辞: 本研究は、NRGグループの学生・大学院生と共同して実施された。Dy-IPは、富士フィルム(株)の協力を得て製作した。中性子イメージングの実施には、日本原子力開発研究機構・東京大学開放研究室の協力を戴いた。応用検証は、PSI SINQ NEUTRAで実施した。ここに心より感謝の意を表します。

参考 (1) 特許公開平 11-023788: 中性子画像記録再生方法

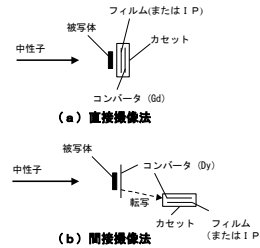


図1 中性子ラジオグラフィ撮像法

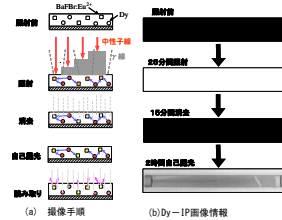


図2 Dy-IPによる撮像原理

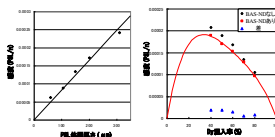


図3 Dy-IPの感度評価

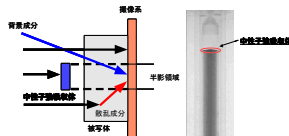


図4 半影法によるウラン濃縮度の評価

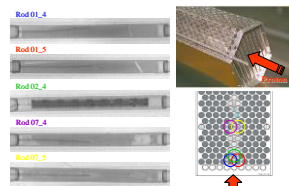
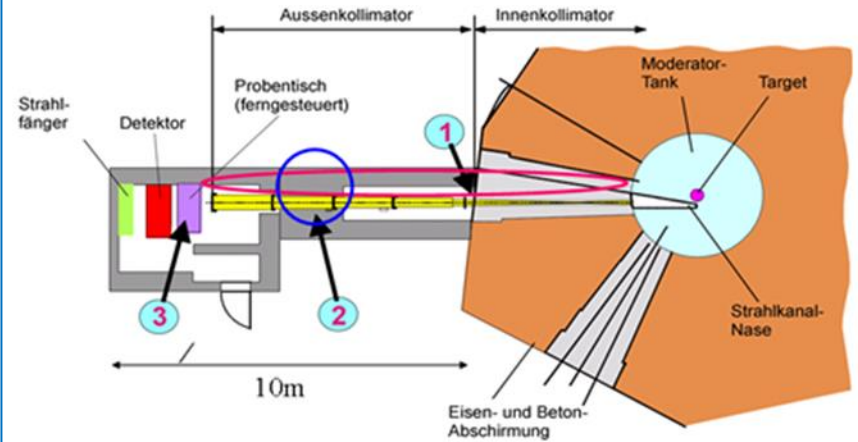
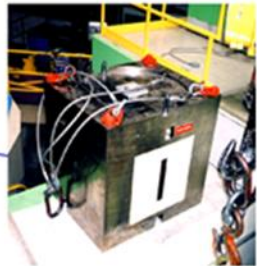
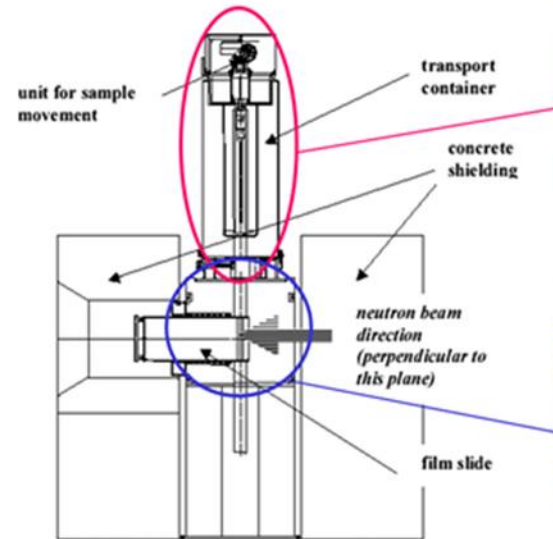


図5 スポレーションターゲットNR像と集合体内配置

Neutron Imaging Facility : NEUTRA, PSI, Swiss



Neutron Imaging Jigs for PIE, PSI

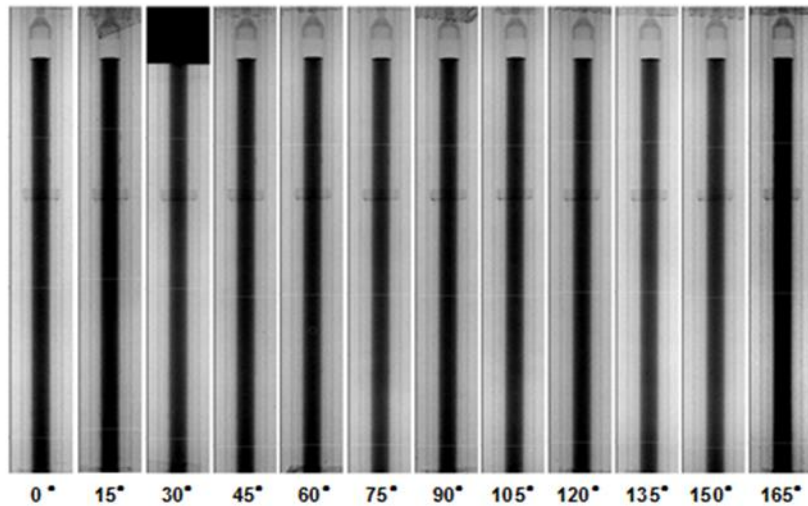


DY-IPデータのNCT

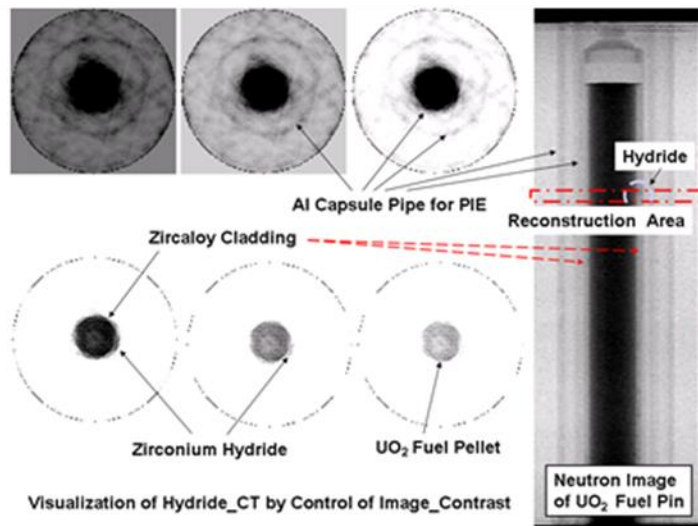
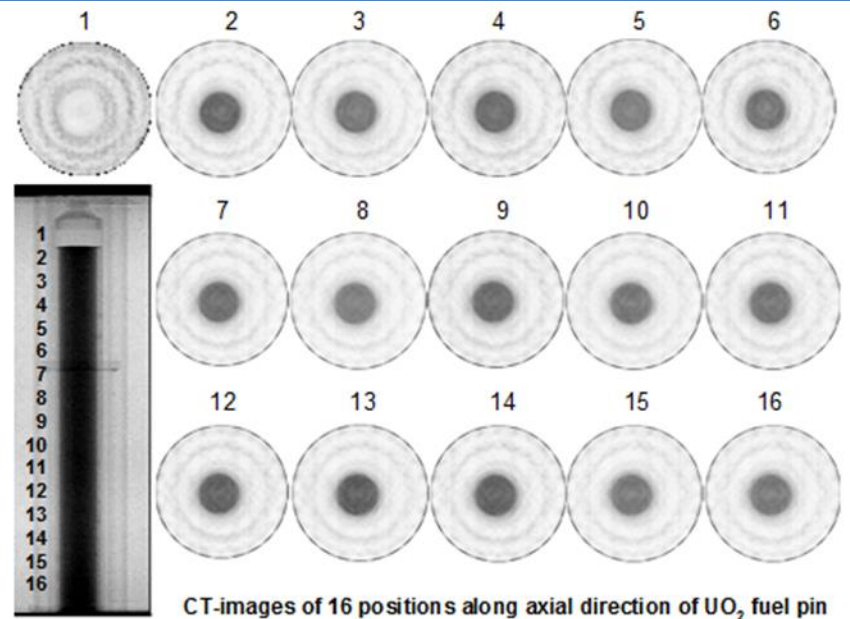
卒業生に協力を得て作成した

ME法の再構成ソフト

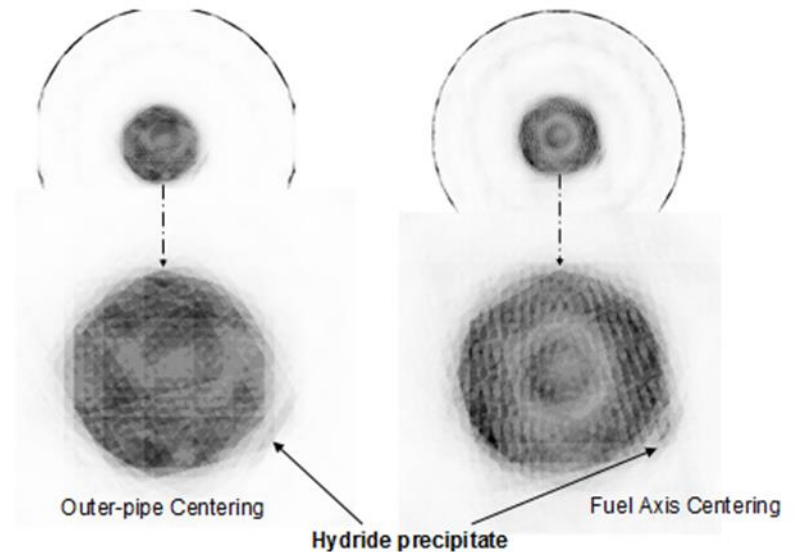
Neutron Images of Post-irradiated Fuel pin (12 projections)



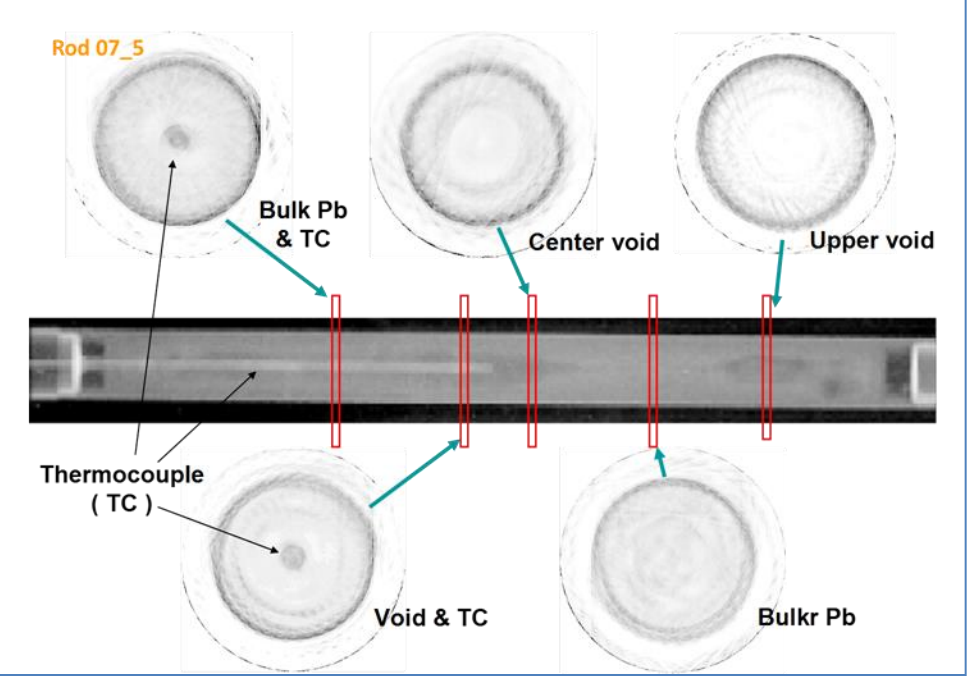
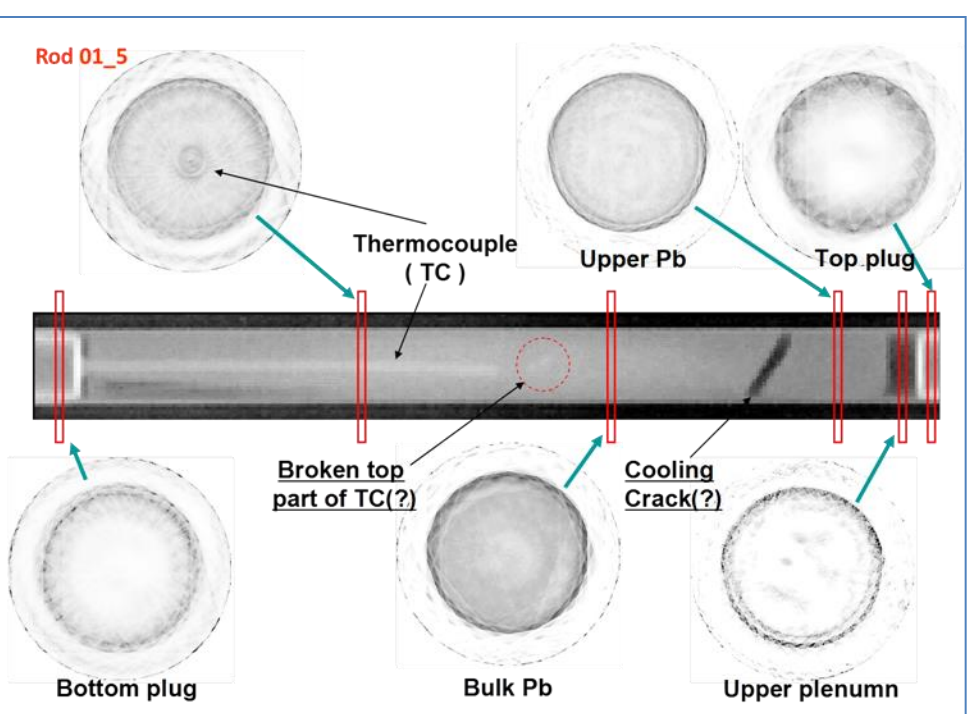
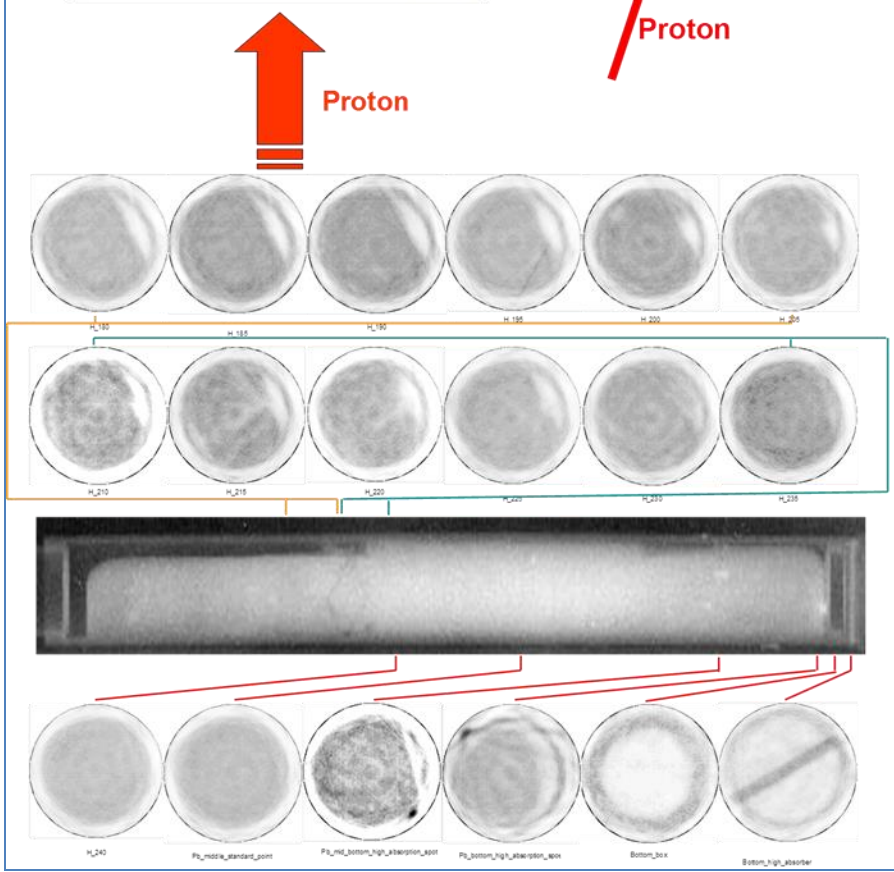
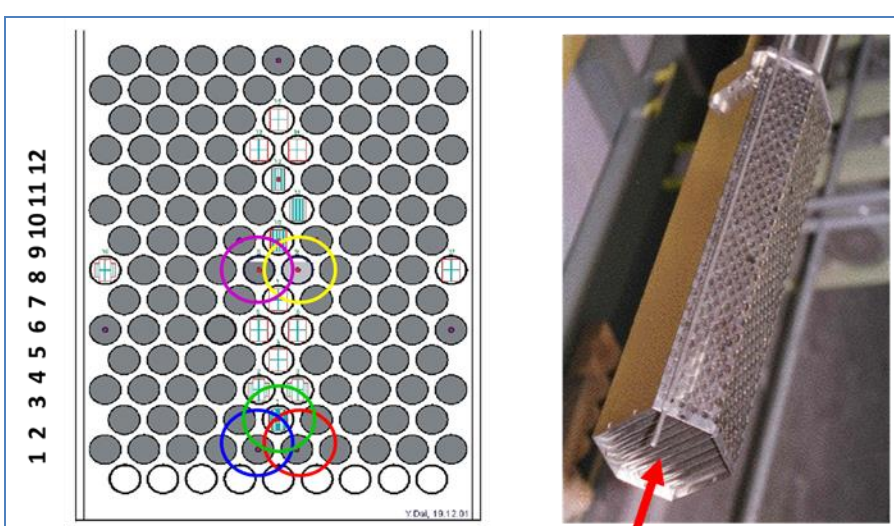
A series of neutron images by a rotation step of 15 degrees for CT projection datasets of a post-irradiated uranium oxide fuel



The contrast step-by-step-control of the CT-image by maximum entropy treatment. The dark parts in the fuel cladding are corresponding to Zr hydrides



Visualization of Hydride Precipitate by Control of CT Rotation Axis



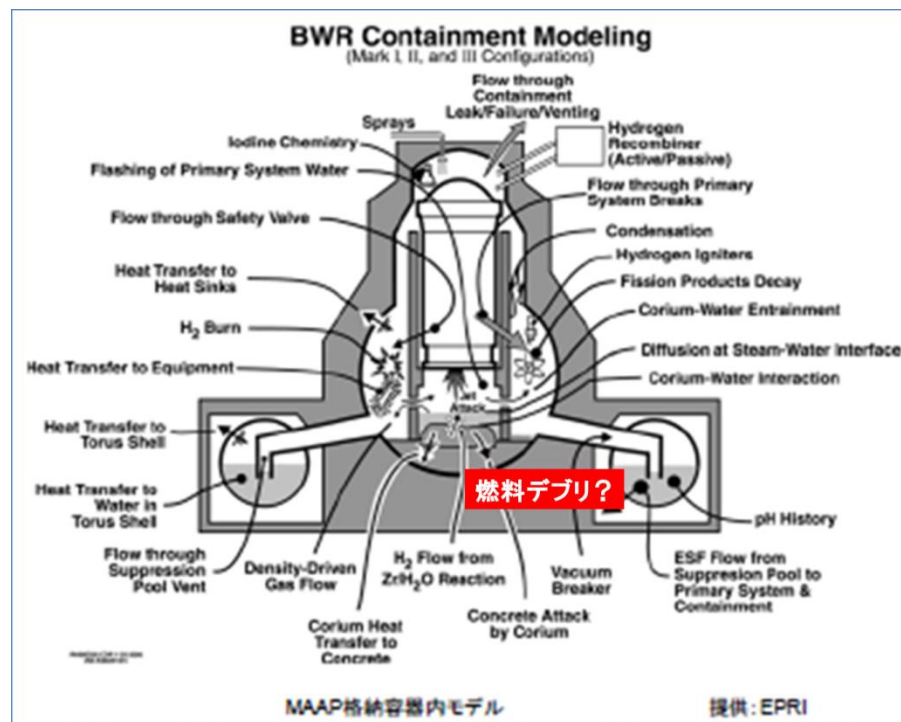
ハルデン_NR施設への適応性
DY-IPから電子撮像系化の要望

(福島原発事故)

よそ事ではなく、自分が試される

4. 応用：事故原発燃料の中性子ラジオグラフィ

(燃料の中性子ラジオグラフィ DY-IPはそのためのもの)



1. 研究の背景

福島原発事故の炉内燃料（図1はTMIの例）の非破壊分析法の確立が事故解析に必要とされている。また、冷却水流配管内の流れ可視化において非回転式CTを可能にすることはその流動の特性上必要とされる。

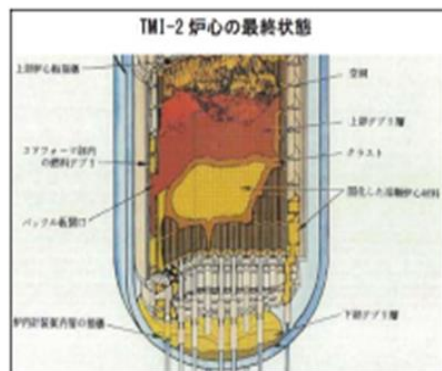


図1. TMI-2事故炉の炉内崩壊燃料の様子

2. 研究の目的と意義

(1) 高放射能使用済み燃料の中性子画像へのガンマ線によるカブリを避けるには、開発したDY-IPによる直進ビーム利用と、単結晶中性子鏡により取り出した回折ビーム利用による画像取得が必要である。そのセットアップを図2に示す。課題は単結晶鏡の中性子取出しの性能である。な多重波長鏡を用意してその特性を評価し、DY-IPとの双方の画像を利用する手法の実用化を図る。

(2) 非回転被写体CTのための多方位中性子ビーム取り出しは、同じ多重波長鏡を

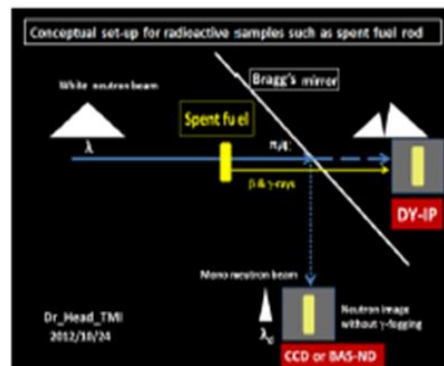


図2. 高放射能体の中性子画像化装置配置

複数体で構成(図3は3方位例)する中性子ビームを被写体に向けて集光し、透過ビームを2次元中性子検出器で画像化、幾何学的歪み補正後CT処理して非回転物のCT断面像を得る。

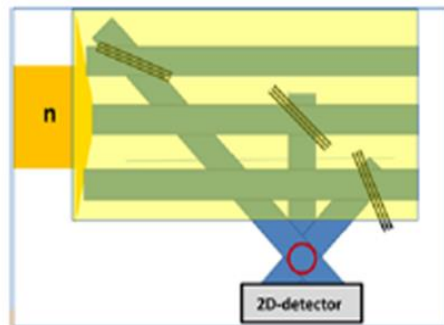


図3. 非回転試料CT用中性子取り出し法

これらを通じて、日本の現状では確立されていない使用済み燃料の中性子イメージングによる非破壊可視化解析を可能にし、また回転が困難な装置内の流体CTを可能にすることができる。

3. 実験の概要

(1) 中性子光学系は図4のような構成である。

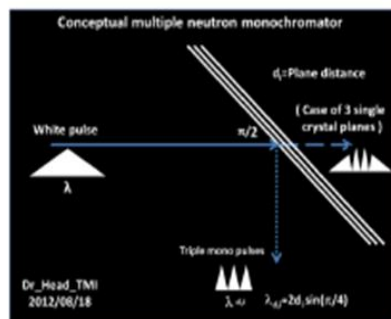


図4. 3重中性子鏡による実験光学構成

中性子鏡の単結晶には表1のような材料・結晶面の組み合わせを用いる。

表1. 中性子鏡用材料と波長特性

Single crystal planes for neutron mirror	
d space(A)	Element/hkl
6.712	GSX/001
3.356	GSX/002
3.278	Ge/111
3.136	Si/111
2.007	Ge/220
1.92	Si/220
1.711	Ge/311
1.678	GSX/004
1.637	Si/311
1.419	Ge/004
1.358	Si/004

装置は申請者が自作した図5のようである。平成22年度の課題実験で使用している。

(2) ビームタイムの内訳: CNRF・TNRF 各2日。CNRFは前期、TNRFは後期を予定して準備する。装置設定に1試料(設置)撮像につき1時間。計12設置で12×1時間。装置の設定・調整用撮像・画像確認に6時

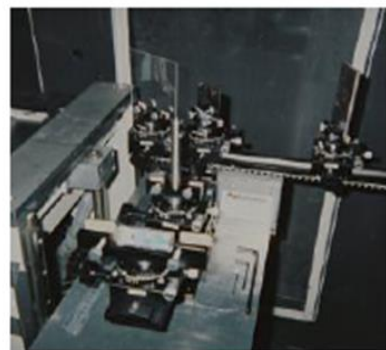


図5. 実験装置 (H22年課題実験で開発)

間。放射能冷却時間6時間。後片付け2時間。合計26時間。2年休止期間があり、新規課題にしたが、装置は、単結晶鏡の種類(単結晶グラファイトに加えて、シリコン・ゲルマニウムの結晶面の数を追加。異なる結晶面を複数枚重ねることで中性子反射強度を稼ぐ。

(3) 装置はほとんどアルミニウム製で放射化を極力抑えている。中性子鏡の材質の炭素・シリコン・ゲルマニウムも放射化はほとんどしない。含まれる不純物の放射化を考慮して冷却時間をとる。用いる材料で毒性はない。イメージングプレートにジスプロシウムが含まれており、1日程度の冷却時間を要する。

(4) 高放射能被写体の中性子イメージング手法の確立は燃料デブリの非破壊3次元透視検査に応用することにより事故燃料状況の解析基礎データを供することができる。また非回転被写体内の流体挙動の3次元可視化も原子炉安全性研究の基礎データを供することができる。これらの手法は新しい研究分野の拡張につながり、若手研究者による利用、育成に供することができる。

ビームタイム待ち

(事故原発・燃料関係情報)

セッション2

[配付資料](#) (研究開発課題と基盤研究への具体的ニーズ)

[配付資料](#) (地殻におけるマグマの冷却)

[配付資料](#) (マテリアルとしてのデブリ)



文部科学省、国際廃炉研究開発機構 (IRID) 共催
東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発計画と
基盤研究に関するワークショップ

溶岩湖(ニイラゴンゴ火山,
コンゴ)

第1回 (9月25日 (水) 10~17時、東京大学本郷キ
ャンパス) (関東地域①)

課題: 燃料デブリ性状把握・事故解析、放射性廃棄
物処理・処分等

炉内状況推定の現状

炉心の初期UO₂重量

1号機	77トン
2号機	107トン
3号機	107トン

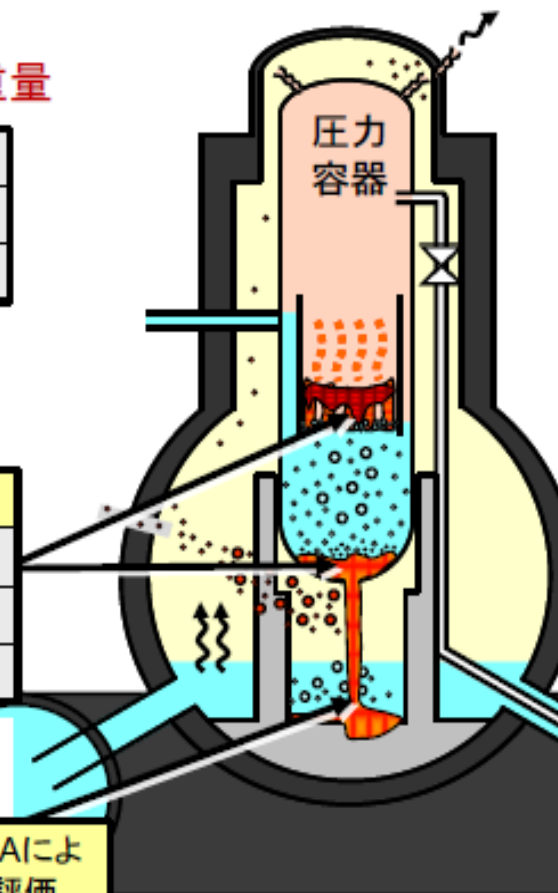
原子炉容器内に残っているUO₂の重量割合

	東電	JAEA
1号機	0%	0%
2号機	43%	30%
3号機	37%	36%

原子炉容器から落下したUO₂の重量割合

	東電による評価	JAEAによる評価
1号機	100%	100%
2号機	57%	70%
3号機	63%	64%

東電による評価 : MAAP
 JAEAによる評価 : MELCOR



- 燃料の大部分は損傷・溶融し、圧力容器下部ヘッド上あるいは格納容器内に落下している可能性が大きい。
- 安全かつ効率的なデブリ取り出し作業を進めるためには、現場から得られる情報の分析と、計算コードを用いた燃料溶融の進展や燃料デブリ及びFPの分布の推定が必要である。
- しかし、炉内状況推定技術及びその結果には、未だ不確かさが含まれていると考えられる。

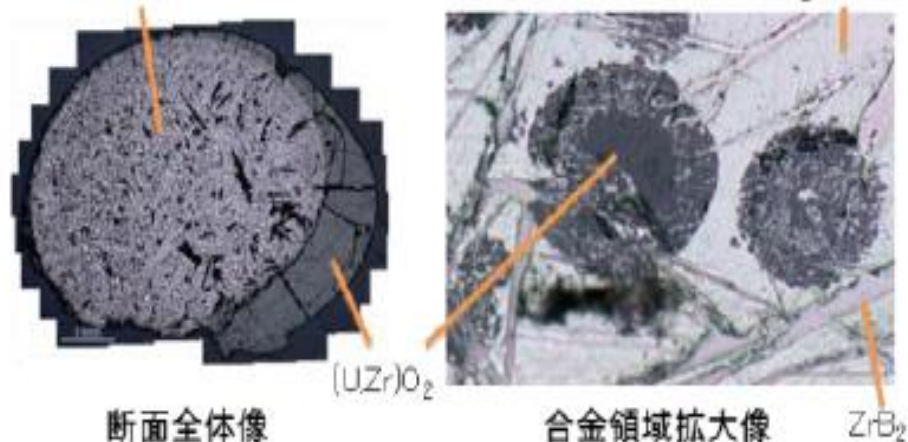
模擬デブリを用いて、1F特有の反応が燃料デブリ特性に及ぼす影響を評価する。

- 海水塩の影響
- 制御棒(B_4C)の影響
- MOXやGd含有の影響

B_4C 制御棒と燃料の反応と生成物の特性把握

合金領域にボウ化物が析出

Fe-Cr-Ni-Zr-U合金+(Fe,Cr) $_2$ B



B_4C 制御棒と燃料の模擬溶融固化物

- B_4C や海水塩との反応生成物の性状評価、特性データ
- 生成条件と相・組織の相関に関するマッピング

燃料デブリ取り出し準備に係る研究開発と課題（5）

■燃料デブリ性状把握・処置技術の開発

- 燃料デブリ取出しに関する安全確保、取出し装置・保管容器開発等において必要となる、デブリの各種性状情報をあらかじめ推定
- 取出し後のデブリの最終的な取扱い(End State)の選択の議論に向けた各取扱い方法の検討

■課題

- 1F事故に特有の条件の考慮（海水の影響等）
- 1F実デブリサンプリングには時間が掛かる。
 - TMI-2及びこれまでの過酷事故研究
- ⇒ 事故進展解析と化学平衡計算の組合せ
 - 模擬デブリの作製とその物性測定等の組合せによる性状推定が必要

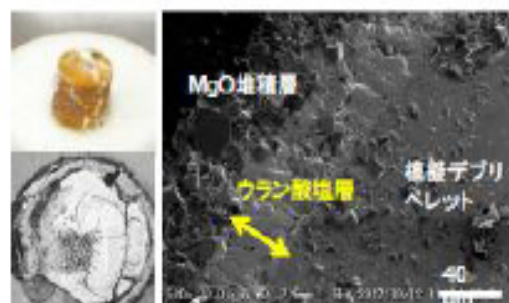
【TMI-2で採取された燃料デブリの例】



【取出しに用いられるツール類の分類】

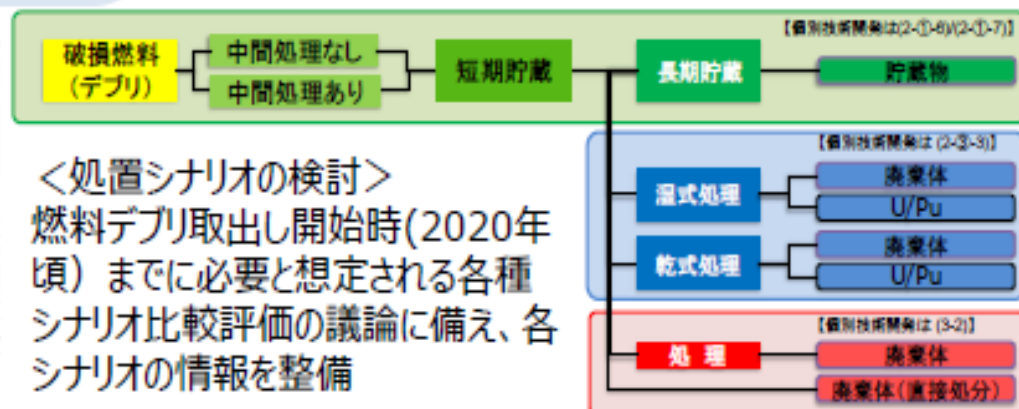
試験結果の例

ペレット状模擬デブリを海水塩とともに加熱(空气中・1000°C・12h)



- 表面にMgO堆積
- 空气中ではCaのウラン酸塩層形成

【模擬デブリと海水塩との高温反応試験】



(1-2) 使用済燃料プールから取り出した損傷燃料等の処理方法の検討

目的

原子炉建屋プールの燃料には海水による塩分の付着が考えられ、一部の燃料は落下したコンクリート片などにより損傷、漏えいしている可能性もある。よって、これらの燃料については、再処理における技術的課題の調査・検討を行うとともに、再処理が可能か否かを判断するための指標を整備するための検討を行う。

実施内容

1. 損傷燃料等に関する事例調査

・国内外における損傷燃料の取扱い実績について調査する。

2. 損傷燃料等の化学処理工程等への影響の検討

(1) 不純物による再処理機器への腐食影響評価

燃料に付着した塩分や燃料に同伴したコンクリート片等の不純物の硝酸への溶解を考慮し、模擬溶液を用いた再処理機器材料の腐食試験を行い、腐食影響を評価する。

(2) 不純物の工程内挙動評価

燃料溶解液への不純物の移行を考慮し、模擬溶液を用いた抽出特性試験等を行い、不純物の化学処理工程内の挙動を評価する。

(3) 不純物の廃棄体への影響評価

不純物の廃液への移行を考慮し、模擬溶液を用いた試験等を行い、不純物のガラス固化体等の廃棄体の性状への影響を評価する。

3. 損傷燃料等のハンドリング等に係る検討

(1) 受入・貯蔵設備におけるハンドリング方法の検討

現在の再処理施設ではハンドリングが困難な損傷燃料に対する、受入・貯蔵設備におけるハンドリング方法を検討する。

(2) 燃料のせん断に係る評価

容器からの燃料取り出しや、チャンネルボックスの取り外しが困難な場合を考慮し、容器やチャンネルボックスとともに燃料をせん断することの可否や処理に及ぼす影響について、模擬燃料を用いた試験等により評価する。

4. 損傷燃料等の分別指標の検討

・上記の検討結果を整理し、再処理が可能か否かを判断するための指標を整備する。

目標工程

事項/年度	第1期		第2期		
	2013	2014	2015	2016	2017
1. 損傷燃料等に関する事例調査	■				
2. 損傷燃料等の化学処理工程等への影響の検討		■			
3. 損傷燃料等のハンドリング等に係る検討			■		
4. 損傷燃料等の分別指標の検討			■		

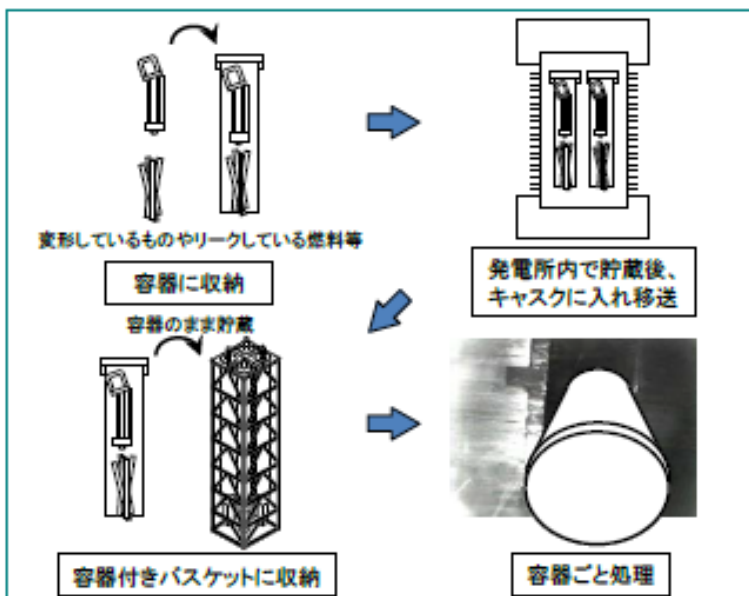
候補となる技術例

要求技術	適用例
損傷燃料等の化学処理等	-
損傷燃料のハンドリング	ピンホール燃料の処理



機器材料の腐食試験 不純物の抽出特性試験 廃棄体への影響評価

損傷燃料等の化学処理工程等への影響の検討



損傷燃料等のハンドリング等に係る検討

新しい研究分野の開拓

- 1Fの廃炉のため従来の「燃料」、「炉」、「処理・処分」という分野の枠にとらわれず、これらを包括的に理解し一体のシステムとすることが重要。
- 1Fの廃炉のために開発した技術を原子力分野のみならず、様々な分野にも応用・発展させ、社会に貢献することが重要。

国際的・学際的な活動

- 1Fの廃炉のため海外研究機関・研究者との連携が必須。
- 原子力以外の地震学、社会学、生物学等の専門家と積極的に交流し、視野を広げることが重要。

社会的受容性の認識

- 1Fの廃炉のため原子力の専門家として、一般人の視点から問題を見据えること(安全の最優先、その技術が人々の生活にどう影響するか)が重要。

放射性物質の分析・研究施設の基本的な考え方及び 立地場所に関する技術的要件（案）

平成25年11月14日
東京電力福島第一原子力発電所
廃炉対策推進会議

1. 放射性物質の分析・研究施設の基本的な考え方

中長期ロードマップに従い、放射性物質の分析・研究に関する技術基盤を確立するとともに、東京電力福島第一原子力発電所の廃炉に向けた研究開発を着実に実施するため、放射性物質の分析・研究施設を整備する。

放射性物質の分析・研究施設では、燃料デブリや放射性廃棄物などに含まれる難測定核種分析手法等の開発や、燃料デブリや汚染水処理後の二次廃棄物等の性状把握、処理・処分技術等の開発等を行う。なお、環境放射線量等の立地環境に鑑みて、施設の一部について、より低線量かつ主要な施設からのアクセスが良好な、他の場所に整備することも同時に検討する。

2. 放射性物質の分析・研究施設の立地場所に関する技術的要件

福島第一原子力発電所の廃止措置を加速させるためには、燃料デブリや事故に由来する様々な放射性廃棄物等についての迅速かつ精度の高い分析データの提供等が重要である。このため、放射性物質の分析・研究施設の整備を早急に行う必要がある。このような観点から、以下に放射性物質の分析・研究施設の立地場所に関する技術的要件を示す。

- A) 福島第一原子力発電所からの試料（ガレキ、汚染水処理後の二次廃棄物、燃料デブリ等）の搬入及び搬入した資料の返送等を容易かつ安全に行うため、当該原発の構内又は隣接地であること。
- B) 建設工事の従事者及び本施設で分析や試験等に従事する技術者の被ばく低減のため、また本施設での精緻な分析を可能とするため、立地場所の環境放射線が支障のない程度に低いものであること。
- C) 円滑な建設工事の実施を担保する観点から、電気、水等のインフラが整備されているか、あるいは容易に整備可能であること。また、立地場所への進入路の拡幅等の措置がほとんど必要ない場所であること。
- D) 建設に必要な敷地面積を有するとともに、中長期ロードマップに明示されている工程の実現性を担保するため、比較的平坦で新たに大規模な造成工事等を必要としないこと。

3. 独立行政法人日本原子力研究開発機構への指示

独立行政法人日本原子力研究開発機構は、放射性物質の分析・研究施設の立地候補地に関して、上記 1. 及び 2. で示した基本的な考え方及び立地場所の技術的要件に基づき候補地を評価し、その結果を報告すること。

現状からの外挿では、NR的には
闇から闇への可能性が高い

補. 事故原発を眺め続けて2年半余

アブストラク 第45回日本原子力学会中部支部研究発表会 平成25年12月17日(火)~18日(水) 名古屋大学(発表予定)

台風26号および降雨などの境界条件過渡変化に対する福島第一1-3号機の内部状態パラメータの応答

Internal Parameter Responses of TEPCO F1 NPPs No.1-3 on Transient Boundary Condition

due to Typhoon 26 and Rainfall for a month of October 2013

○玉置 昌義 (TMI)

Masayoshi Tamaki (TAMAKI Memorial Institute)

1. M. Tamaki, "Lesson and Learn from "Fukushima Daiichi" 100 Day's Tweets", Global 2011 (Dec. 2011).
2. M. Tamaki, "For the Non-destructive Visualization of the Irradiated and Failed Fuels and Materials from the Fukushima-1 NPP using the Neutron Imaging by the γ -insensitive Dy-doped Imaging Plate", Global 2011 (Dec. 2011).
3. 玉置昌義、"Dr_Head_TMI の福島第一原発に関するツイートのまとめ(1)(2)"、原子力学会中部支部第43・44回研究発表会(2011, 2012)。

台風 26 号および降雨などの境界条件過渡変化に対する福島第一 1 - 3 号機の内部状態パラメータの応答
Internal Parameter Responses of TEPCO F1 NPPs No.1-3 on Transient Boundary Condition
due to Typhoon 26 and Rainfall for a month of October 2013

○玉置 昌義 (TMI)

Masayoshi Tamaki (TAMAKI Memorial Institute)

【前回発表までの経緯】 東電 HP の福島第一事故原発に関する公開データを見つめ続けて 1 年 9 ヶ月。日々炉内で起った現象について、定性的ながら議論のツイートを展開し、本研究発表会などで報告してきた (1-3)。東電原発管理者による計画的入出力パラメータの過渡変化が及ぼす内部状態変化の把握に努めたが、制約があるデータ収集の中では境界条件があいまいなままの議論をせざるを得ないケースが多かった。

【今回発表への経緯】 2013 年 10 月のひと月間には、台風 26 号や大雨などにより、揺れ動いた事故原発の外側境界条件 (図 1) が、格納容器・圧力抑制室などの開口部を通して、事故原発内部の状態パラメータに思わぬ変動を誘起させ、またとない議論の焦点の存在を示してくれた。この 10 月の東電 HP データ処理から垣間見る事が出来た事故原発のいくつかの側面について報告する。

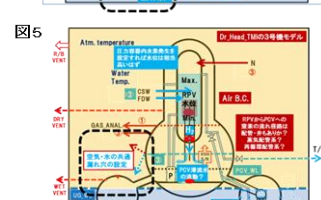
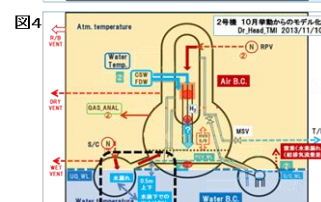
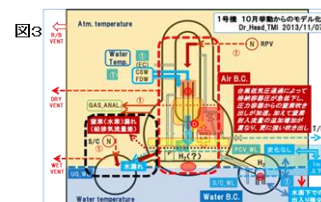
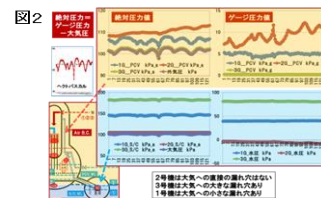
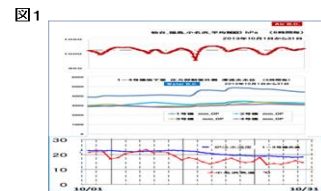
【事故機モデル】 何が事故原発の中で進行しているか。原発事故機を簡素化した前回の境界単純モデルを、格納容器・圧力抑制室内の最小限の基本的な内部構造を反映させた新しいモデルに発展させ、東電 HP に公開される事故機プロセス・パラメータデータの処理結果を描き込みながら、見えてくる姿の図式化を試みた。

【簡略に表現した主な知見】 : (1) 事故原発の外部境界条件のうち、台風 26 号・降雨などによる大気圧・地下室水位の変動が及ぼす格納容器・圧力抑制室内の圧力応答 (図 2 グラフ上段) は、格納容器内水位評価 (同下段) と合わせて考えることによって、1・3 号機は気相部に、2 号機は液相部に開口部があることを浮かび上がらせてくれた。(2) 種々のパラメータ推移から推察できる 1-3 号機の状態把握の結果を、それぞれモデルに書き込んで、図 3-5 にまとめた。(3) また格納容器内水素濃度の気圧変動及び窒素封入方式変更への依存性が、見かけ上の水素発生個所として、1 号機は圧力抑制室、2・3 号機は圧力容器 (及び或は格納容器) であることを示唆してくれた。

【その後の展開】 : 2013 年 11 月に入って東電から公開された 1 号機建屋地下のトラス室における水漏れ箇所的位置確認結果は、10 月のデータから推察された知見との相性はいいものの、2 年半余のデータ処理結果の教える事と合わせると、格納容器内パラメータ (主に温度: 図 6) 推移との 3 次元的位置対応までを直接示すまでには至らず、議論の展開については、更なる考察が必要であるとしているところです。

詳細については、さらに検討を加え、その結果にも触れながら、発表する予定です。

1. M. Tamaki, "Lesson and Learn from "Fukushima Daiichi" 100 Day" s Tweets", Global 2011 (Dec. 2011).
2. M. Tamaki, "For the Non-destructive Visualization of the Irradiated and Failed Fuels and Materials from the Fukushima-1 NPP using the Neutron Imaging by the γ -insensitive Dy-doped Imaging Plate", Global 2011 (Dec. 2011).
3. 玉置昌義, "Dr_Head_TMI の福島第一原発に関するツイートのまとめ (1) (2)", 原子力学会中部支部第 4 3・4 4 回研究発表会 (2011, 2012)。



10月の天候

2013年（平成25年）10月の特徴：

○北日本から西日本にかけて顕著な高温

日本の東海上の太平洋高気圧の勢力が平年より強く、また偏西風も平年に比べて北寄りに流れたため、北日本から西日本にかけて月平均気温がかなり高かった。特に東日本の月平均気温は+1.9℃で、1946年以降では1998年と並んで最も高かった。

○全国的に多雨・曇照

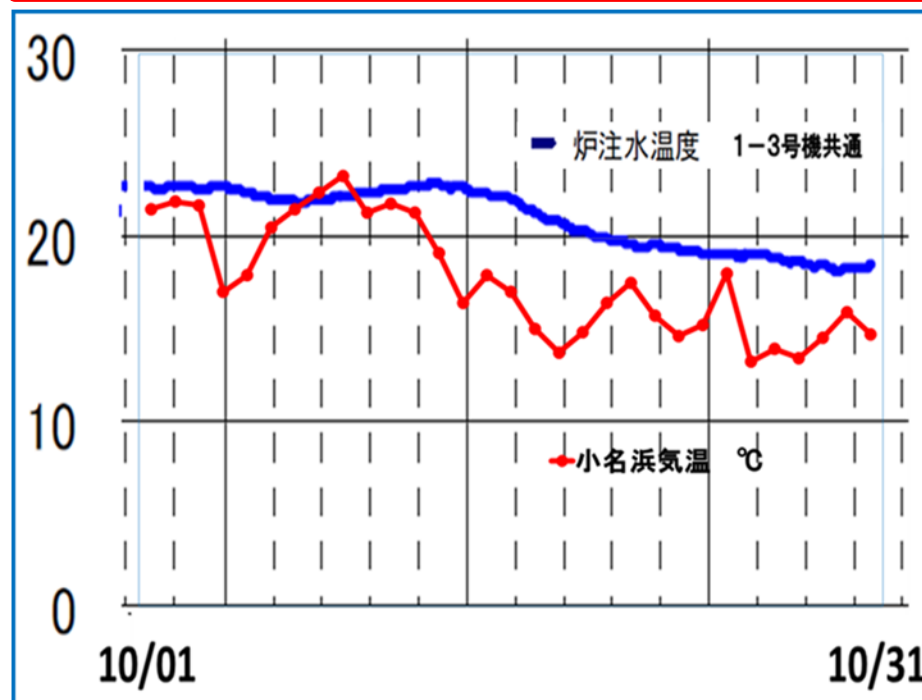
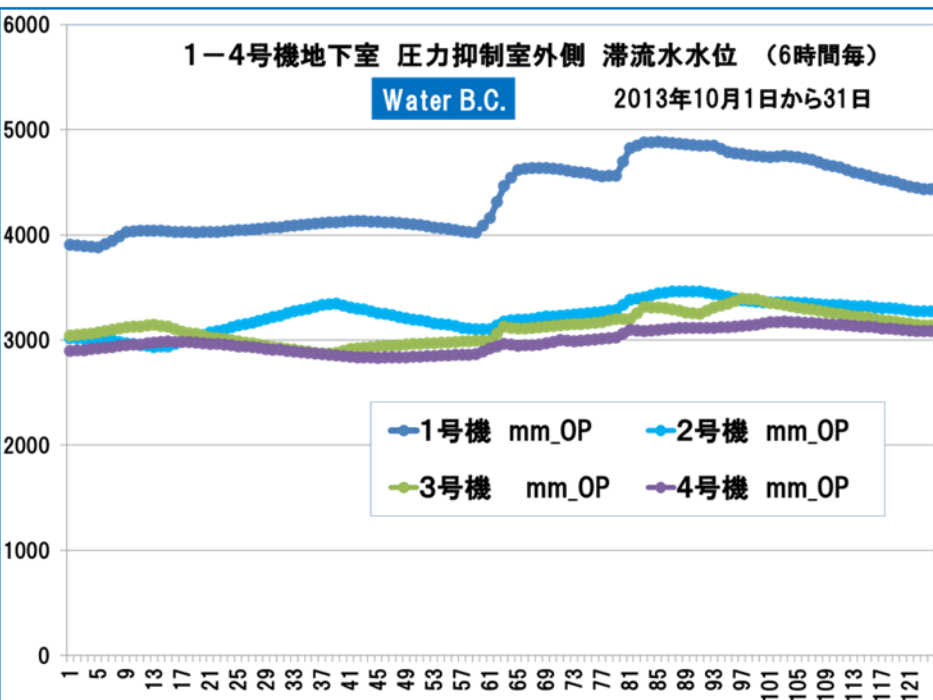
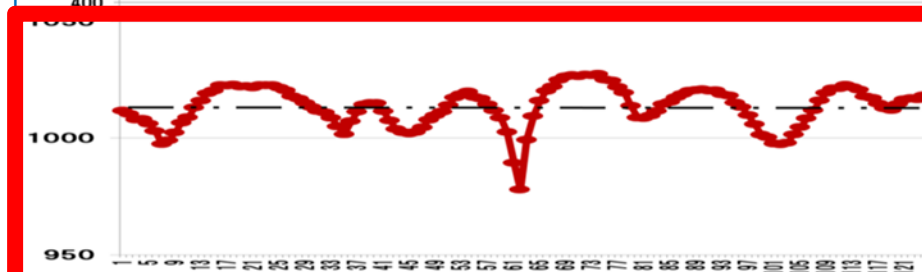
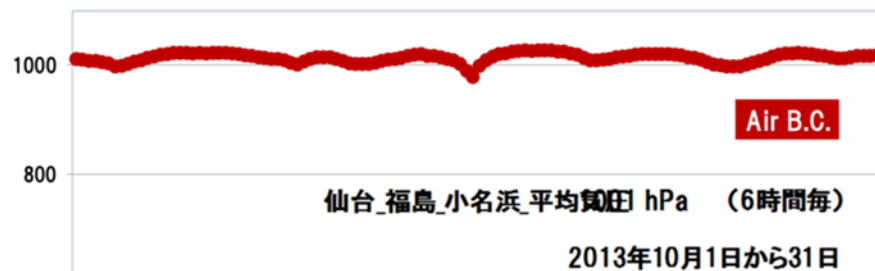
台風の影響が多かったことや秋雨前線の影響で、全国的に降水量が多く、日照時間は少なかった。北日本では降水量がかなり多く、日照時間はかなり少なかった。東日本と西日本日本海側では、降水量がかなり多かった。

○台風第26号で東日本太平洋側では大雨

台風第26号の影響で、記録的な大雨となった東京都大島町で大規模な土砂災害が発生し、多くの人的被害が発生した。

1 概況

日本の東海上の太平洋高気圧の勢力が平年より強く、また偏西風も平年に比べて北寄りに流れたため、北日本から西日本にかけて上旬に記録的な高温となった。これらの地域の月平均気温はかなり高く、特に東日本の月平均気温は+1.9℃で、1946年の統計開始以来、1998年と並んで1位タイの高温となった。一方、台風の影響が多かったこと（10月に接近した台風の数と1951年の統計開始以来の順位は、日本への接近数6個で1位、沖縄・奄美への接近数4個で1位、本土（北海道、本州、四国、九州）への接近数3個で2位タイ）や秋雨前線の影響で、全国的に降水量が多く、日照時間は少なかった。北日本では降水量がかなり多く、日照時間はかなり少なかった。東日本と西日本日本海側では、降水量がかなり多かった。また、台風第26号が発達しながら日本の南海上を北上し、大型で強い勢力のまま16日に暴風域を伴って関東地方沿岸に接近した影響で、住家被害、土砂災害、河川の氾濫等が発生した。特に東京都大島町では、16日の朝までの24時間に、平年の10月の降水量の2.5倍に相当する824.0ミリもの記録的な大雨が降ったため大規模な土砂災害が発生し、多くの人的被害が発生した。



2013年10月モデル

Atm. temperature

R/B
VENT

Water
Temp. ①
(EC)
CSW
FDW

①②③

①②③

Air B.C.

DRY
VENT

GAS_ANAL.

①②③

D
HVH
S/R

T/B

WET
VENT

①②
N

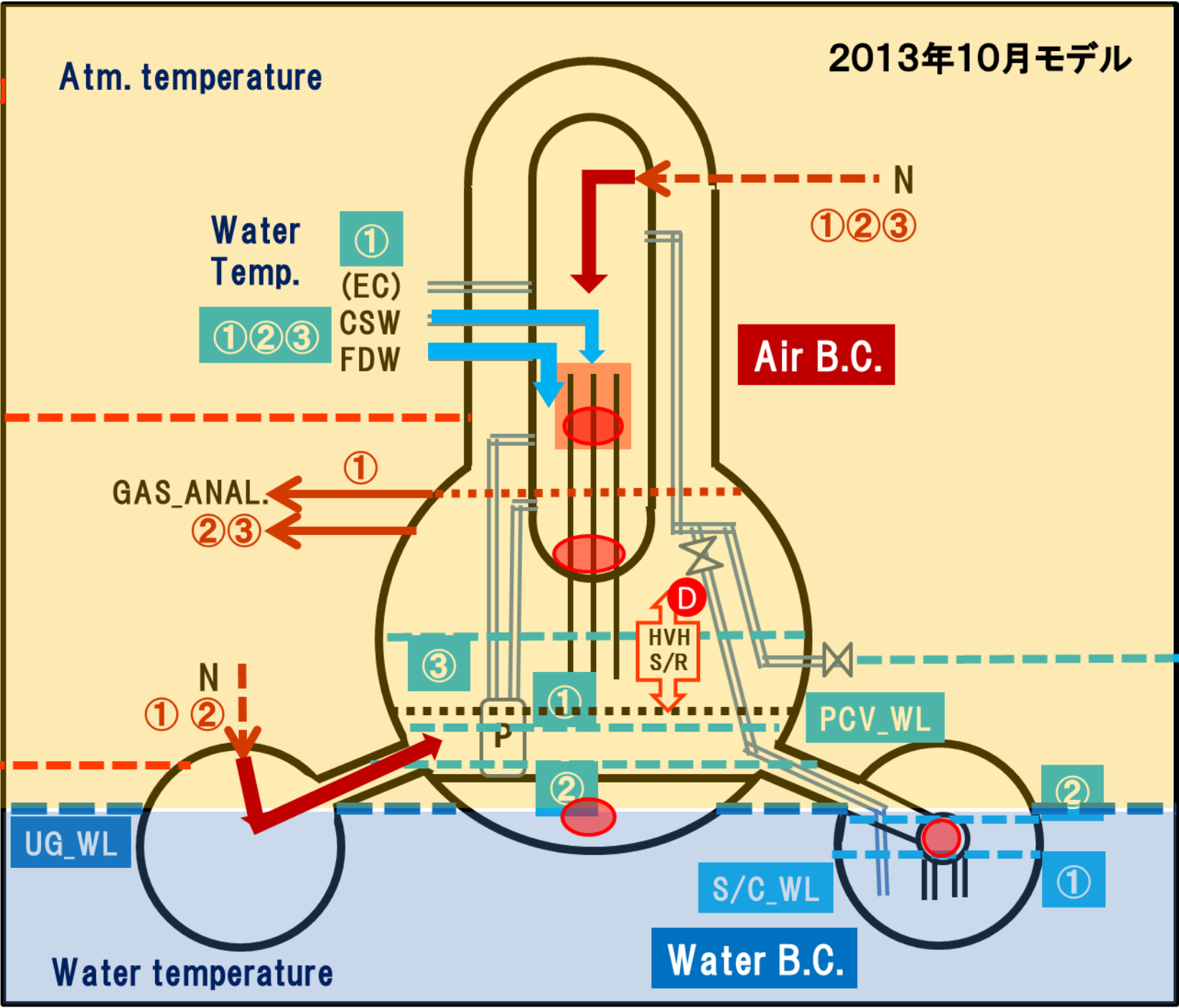
PCV_WL

UG_WL

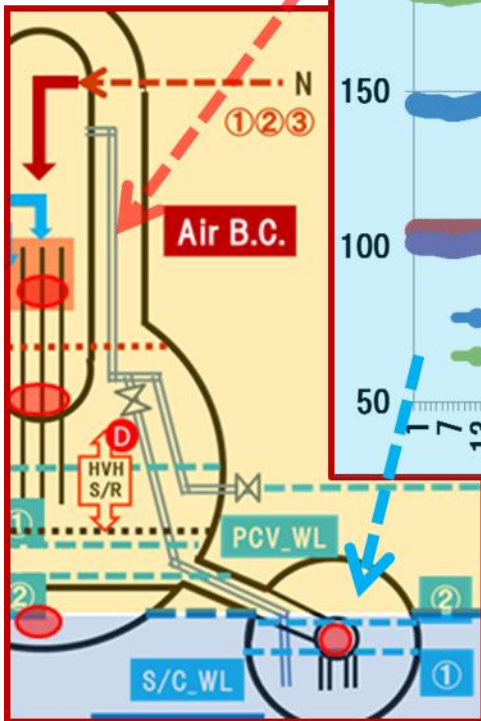
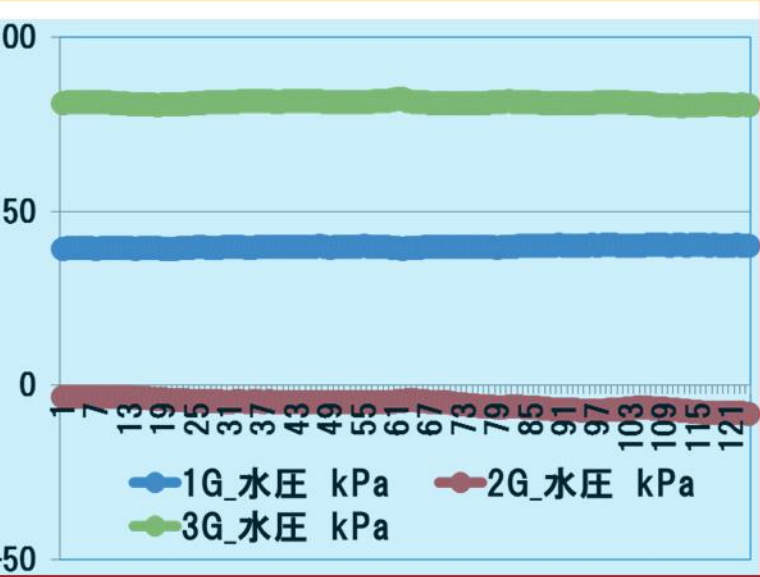
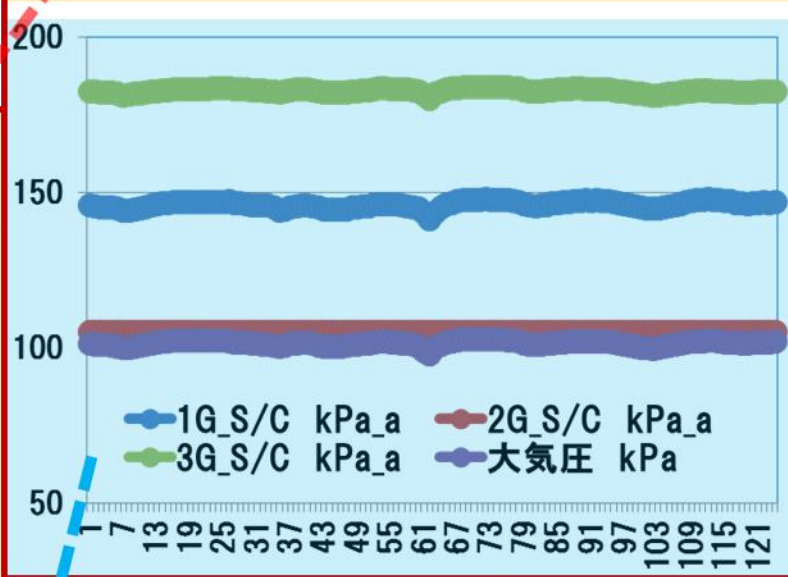
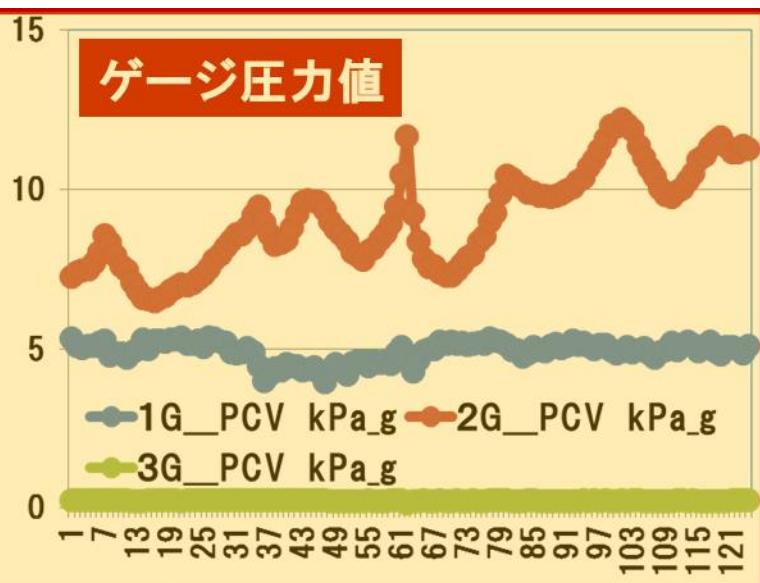
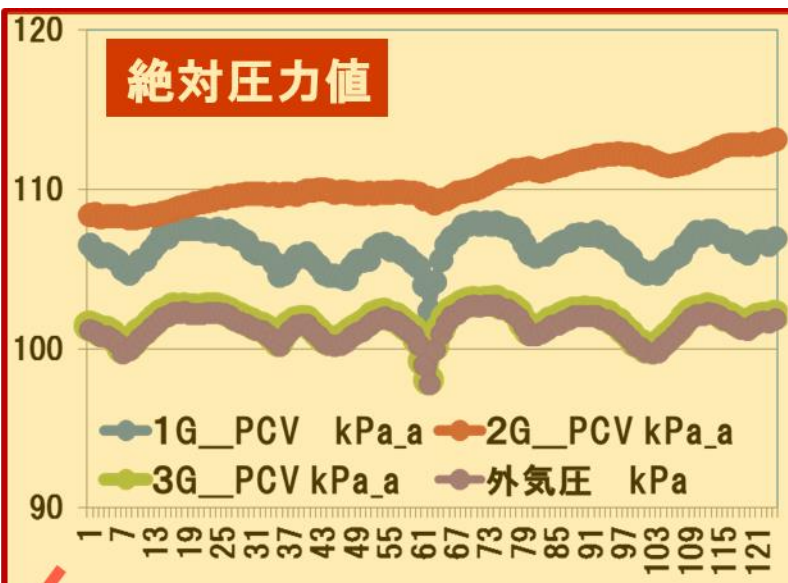
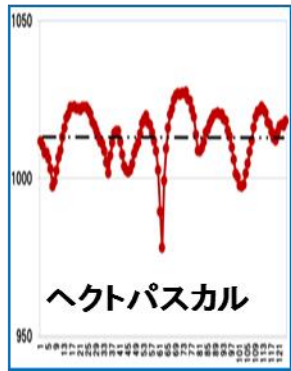
S/C_WL

Water temperature

Water B.C.



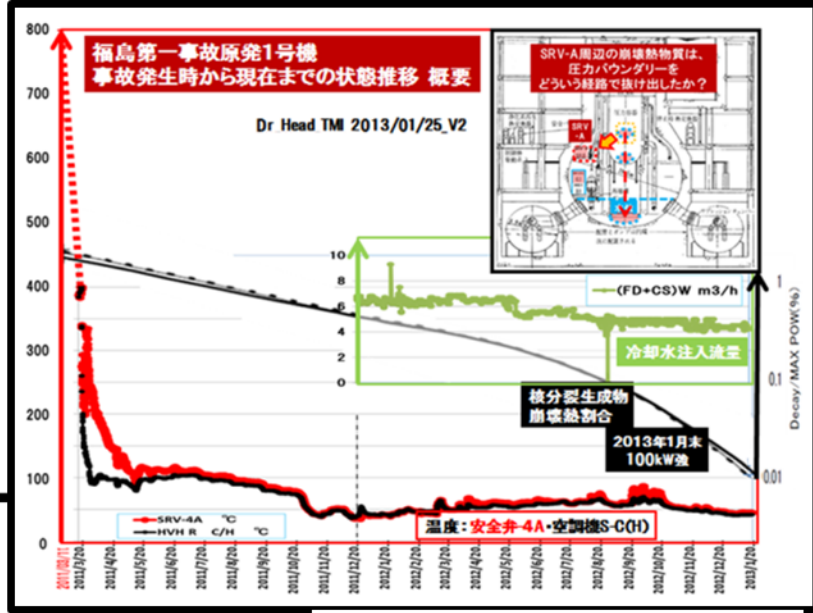
絶対圧力 =
ゲージ圧力
- 大気圧



2号機は大気への直接の漏れ穴はない
3号機は大気への大きな漏れ穴あり
1号機は大気への小さな漏れ穴あり

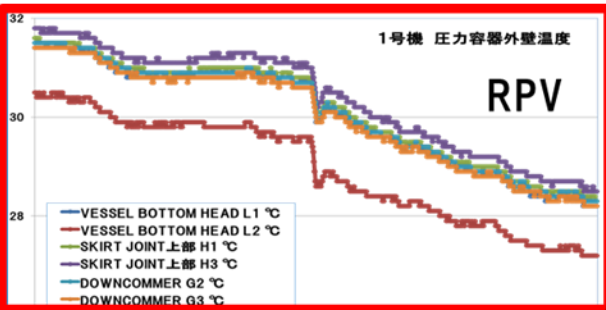
1号機ベント管下部周辺の調査結果

ベント管（S/C側）上部方向からの漏えいを確認
 サンドクッションドレン管の破損および漏えいを確認
 と 事故直後からの1号機挙動推移 との相関性試論

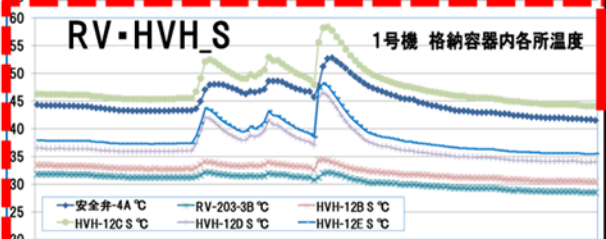


2011年3月—2013年1月

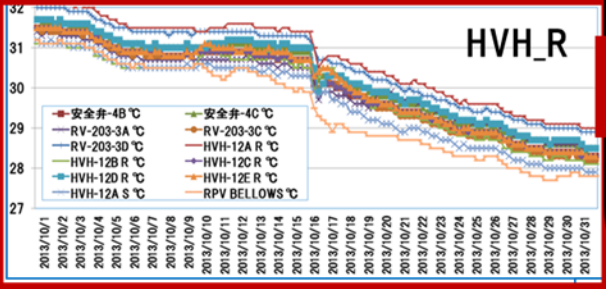
1号機挙動経緯とVENT管調査との立体的関係から、メルトスルー燃料デブリの直接アタックによるPCV-VENT管接合部破壊との結論は困難



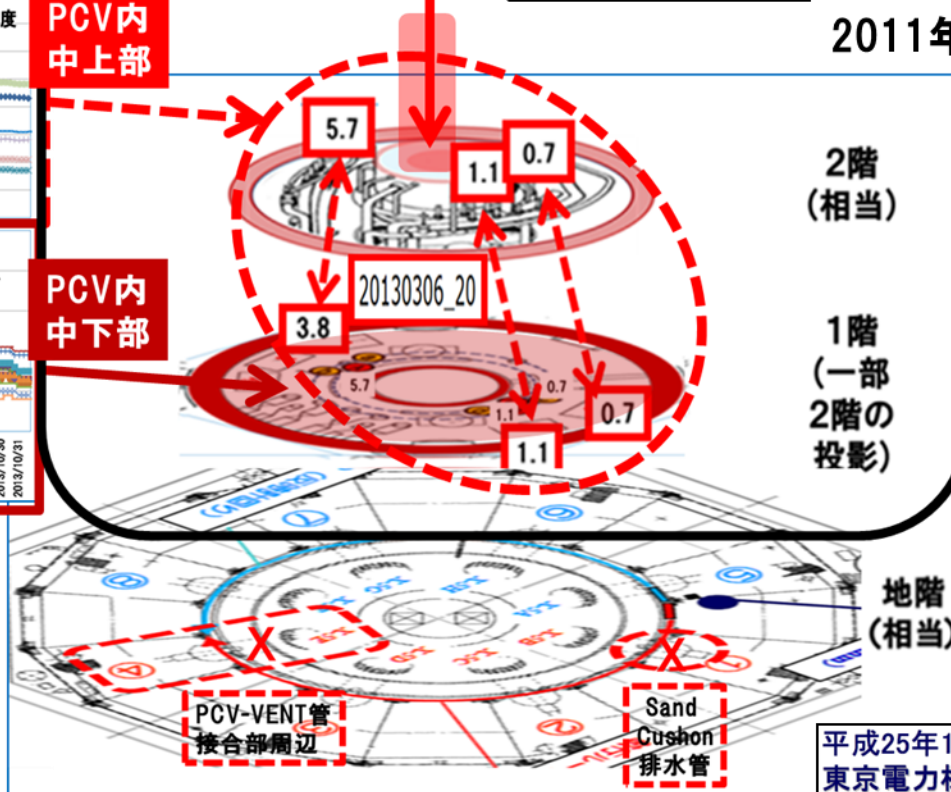
RPV



PCV内
中上部



PCV内
中下部



2階
(相当)

1階
(一部
2階の
投影)

地階
(相当)

2013年10月

PCV-VENT管
接合部周辺

Sand
Cushion
排水管

平成25年11月14日
東京電力株式会社

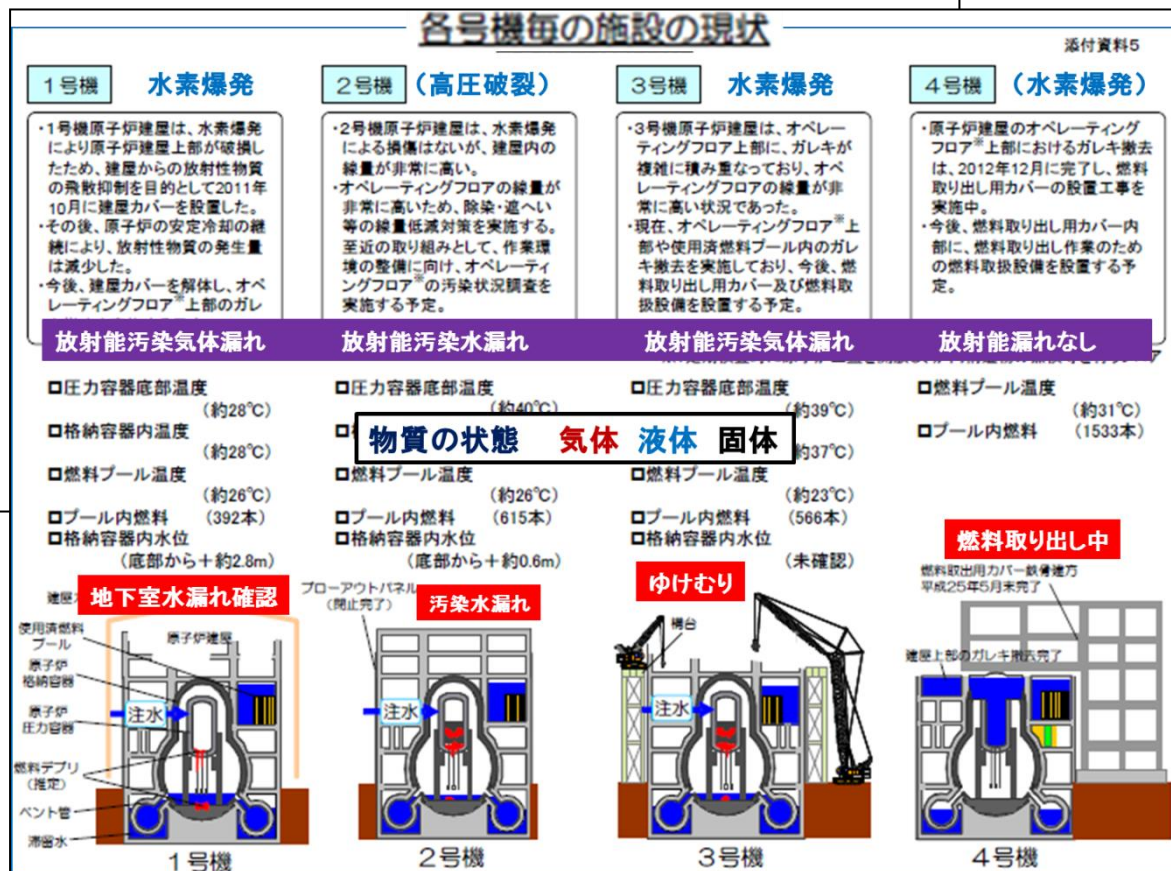
福島事故原発の現状

(1)地震の段階での破壊

(2)メルトダウン・メルトスルー時の高温・高圧による破壊

(3)水素爆発等の 衝撃による破壊

その結果を受けて、
2年半余の推移を
経て、現状がある。



Conceptual set-up for radioactive samples such as spent fuel rod

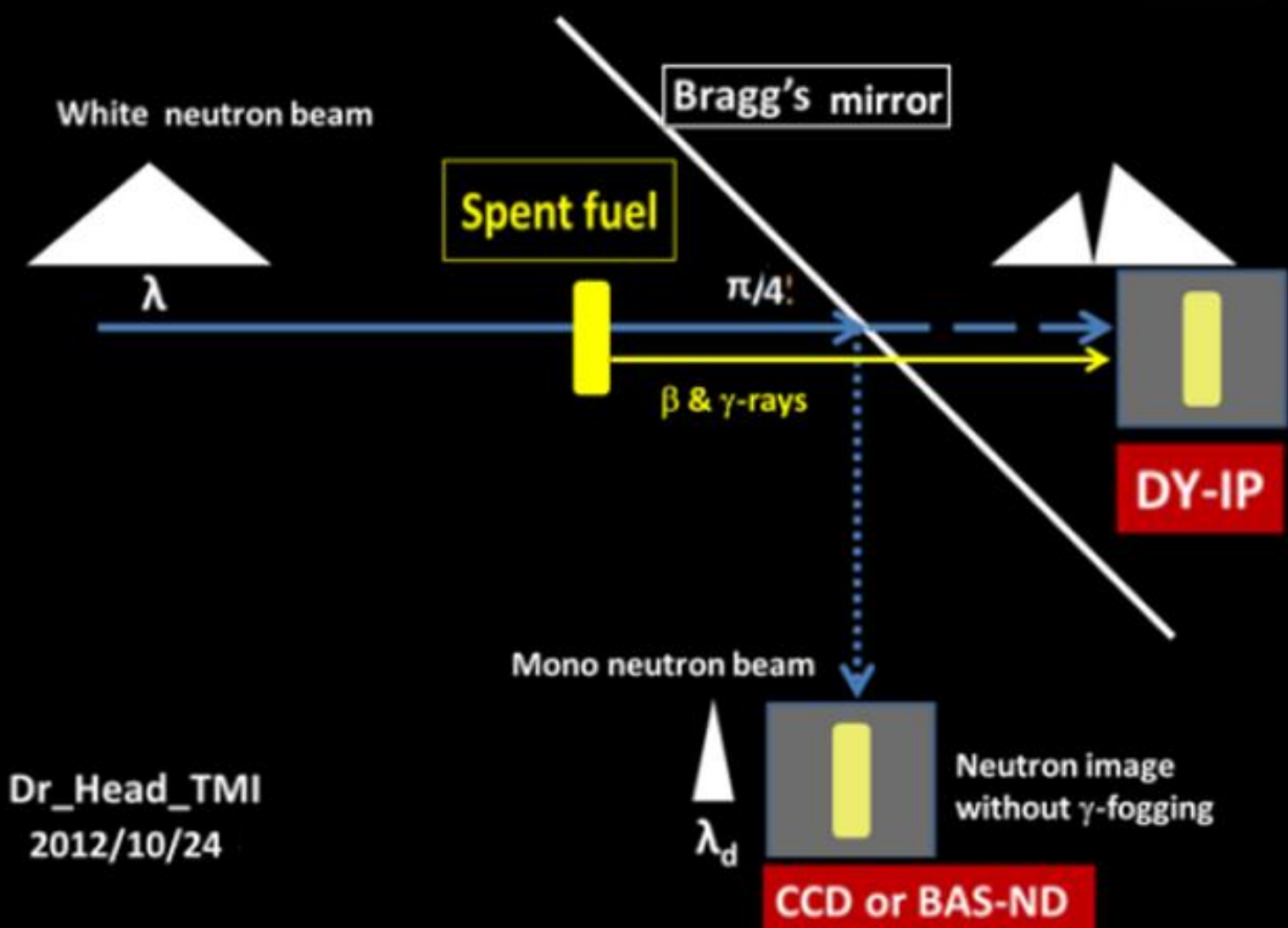


図 2. 高放射能体の中性子画像化装置配置

