

第18回先進原子力科学技術に関する連携重点研究討論会
日本原子力研究開発機構・量子科学技術研究開発機構施設利用共同
研究、弥生研究会成果報告会（2023年8月7日開催）

ポスターセッション要旨集

^{90}Sr Resonance ionization mass spectrometry

Hasegawa Lab, Department of NEM/NPS, UTokyo

Abstract

Resonance ionization mass spectrometry (RIMS) uses the transition energy differences between different elements and different isotopes to achieve isobaric suppression, and high selectivity for isotopes. Moreover, multi-step resonance ionization can excite atoms into specific Rydberg states, thereby improving **ionization efficiency**. This research mainly focuses on the three-step resonance ionization scheme of **460.9 nm - 655.2 nm - 426.3 nm** and studies the **isotope shift (IS)** between Sr isotopes, and the **Stark shift** of Sr atoms in the high Rydberg state.

DFOC (digital fringe offset control) systems for different laser schemes of Ca and Sr have been developed in our lab for a long time [1][2]. Based on this system, we measured the IS of stable Sr isotopes under the laser scheme of 689.4 nm - 487.4 nm - 393.8 nm in our previous study and found that Na influenced the production of Sr atoms in the low heating temperature range, but had no effect in the high heating temperature range [3]. In addition, we also studied the Stark effect of Sr atoms in the high Rydberg state due to the electric field distribution under the laser scheme of 460.9 nm - 655.2 nm - 426.3 nm in previous experiments [4].

Objectives

1. Research on IS measurement data and estimation for ^{90}Sr under the laser scheme of 460.9 nm - 655.2 nm - 426.3;
2. Research on Stark shift for Sr atoms on high Rydberg states;

Methodology

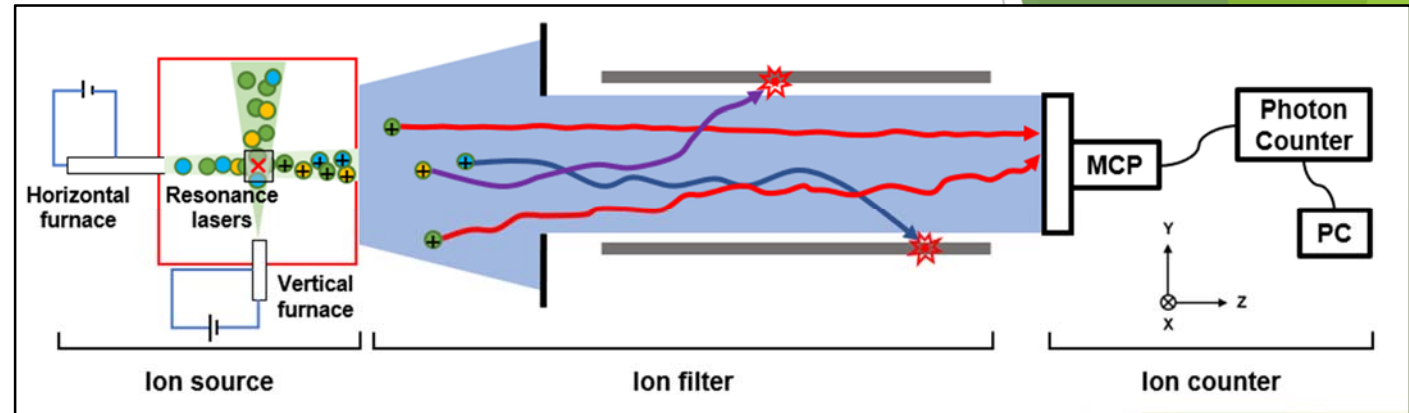
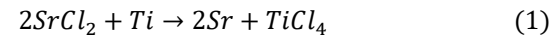


Fig.1 Schematic of the Sr-RIMS apparatus

Fig.1 shows the furnaces in vertical and horizontal directions, both of which usually work under the current ranging from 20 A to 40 A. The **horizontal furnace** heats the **liquid Sr sample** wrapped by Titanium foil and generates Sr atom vapor through a redox reaction shown in equation (1), and the **vertical furnace** heats the Sr metal sample directly generating Sr atoms.



After the Sr atom absorbs the laser photons shown in scheme 1 or 2 of Fig.2, it transits to the energy levels higher than IP and then **autoionizes**. The generated Sr ions will first be accelerated by a DC electric field, and then enter the ion filter, where the target Sr isotope ions are selected by the **quadrupole mass filter** (Extrel RP_2010A, 2.1 MHz, 19 mm). Finally, these selected Sr ions are detected by the **microchannel plate** (MCP). The count rates of Sr ions will be measured by a photon counter (SRS SR400) and the data obtained will be recorded and analyzed by a LabVIEW program on a personal computer (PC).

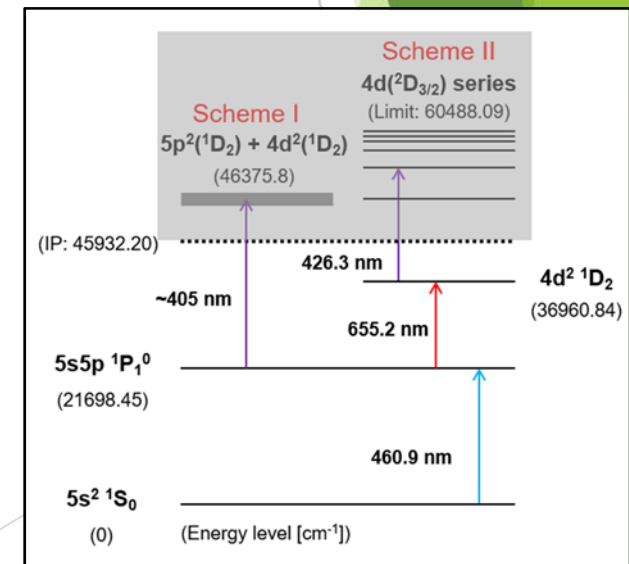


Fig.2 The currently used resonance laser schemes

^{90}Sr Resonance ionization mass spectrometry

Hasegawa Lab, Department of NEM/NPS, UTokyo

Results

Laser	$^{84-88}\text{Sr}$	$^{86-88}\text{Sr}$	$^{87-88}\text{Sr}$
460.9 nm	-280.6 MHz	-119.6 MHz	-48.8 MHz
655.2 nm	-785.6 MHz	-351.1 MHz	-185.1 MHz

Table 1. Measured IS data

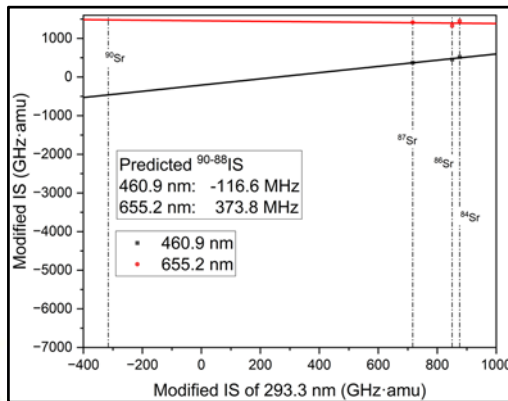


Fig.3 The estimated $^{90-88}\text{Sr}$

IS measurement

The data of $^{84-88}\text{Sr}$, $^{86-88}\text{Sr}$ and $^{87-88}\text{Sr}$ have been measured.

Estimated $^{90-88}\text{Sr}$

By using the **King plot**, the estimated $^{90-88}\text{Sr}$ at 460.9 nm and 655.2 nm were **-116.6MHz** and **373.8 MHz**.

The estimated isotope shifts can be used in the future during the real ^{90}Sr experiment.

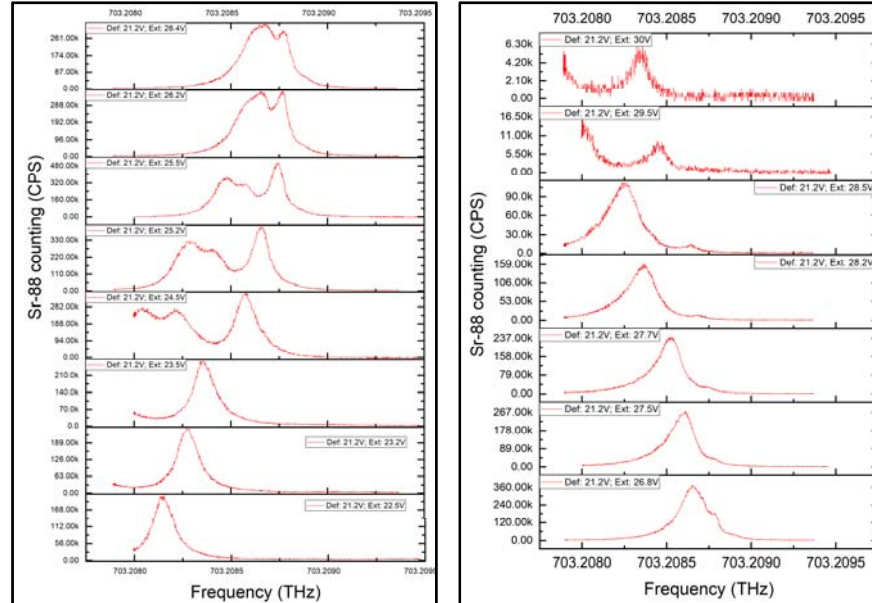


Fig.4 The Stark shift of ^{88}Sr at 426.3 nm laser under scheme II

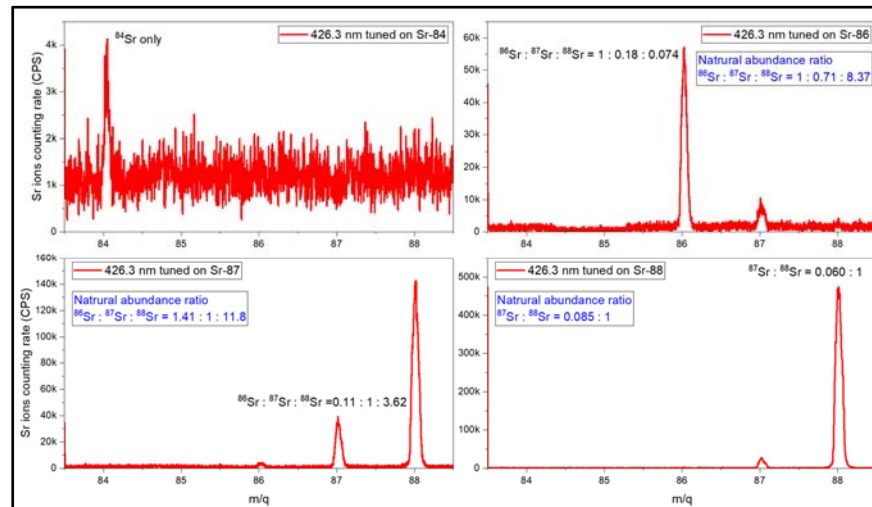


Fig.5 The mass spectrum when tuning to target Sr isotope

Stark shift

Scheme II will excite the Sr atoms into the Rydberg states ($n \sim 39$), at such conditions Sr atoms will be more sensitive to the electric field. In Fig.4, some of the main peaks follow the quadratic distribution which is reasonable, while we thought at such a high Rydberg state, Sr atoms were more similar to alkaline metals, so these came-and-vanished split peaks probably demonstrated the **crossing sublevels** of different l-degeneracy.

Mass-scan for current RIMS apparatus

Fig.5 shows the mass spectrum for Sr isotopes under scheme II, except for ^{88}Sr - ^{87}Sr , current RIMS apparatus has already shown considerable mass resolution for Sr isotopes.

Conclusion

Studies on **IS and the Stark shifts** under 460.9 nm - 655.2 nm - 426.3 nm have been done. The phenomena of the Stark shift will be researched more, and the real ^{90}Sr sample will be used for the experiment in the near future.

Reference

- [1] Jung K. et al., *The 6th International Conference on Trapped Charged Particles and Fundamental Physics*, 2017: **39-51**.
- [2] Jung K. et al., *Japanese Journal of Applied Physics*, 2017, **56(6)**: 062401.
- [3] Iwata Y. et al., *Hyperfine Interactions*, 2020, **241**: 1-8.
- [4] Iwata Y. et al., *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, **265**: 107549.

可搬型3.95MeV小型X線源を用いた橋梁の非破壊検査技術研究開発

長谷川秀一¹⁾、草野穰一²⁾、土橋克広¹⁾、杉田彰夫¹⁾、安倍昌宏¹⁾

1) 東京大学工学系研究科原子力専攻 2) 株式会社NAT

目的：老朽化した道路や橋梁などの社会インフラにおいて構造物深部を非破壊で検査する技術が求められている。PC橋梁には鋼材の腐食あるいはグラウト未充填により劣化が進んでいるものがあるが外観には変化が表れにくいため非破壊検査技術重要である。3.95MeVのX線源は橋梁検査に限り屋外での使用が認められており、このX線源を利用した非破壊検査技術の研究開発を行う。

研究概要：2022年度は妙高大橋（旧橋、新潟県）と宮津橋（富山県）の2箇所の実橋梁における劣化状況の調査研究を実施した（図1）。実橋梁では複数のPC鋼材やそのほかの鉄筋などがコンクリート内に埋設されているので取得撮像画像は複雑となり構造物の識別とその状態判定がむずかしいため、撮像画像の診断に先立ち、研究室内で橋梁の供試体を使ったモデル実験を実施するとともに、実橋梁に近いモデルについてPHITSによるX線撮像画像のシミュレーションを行った。

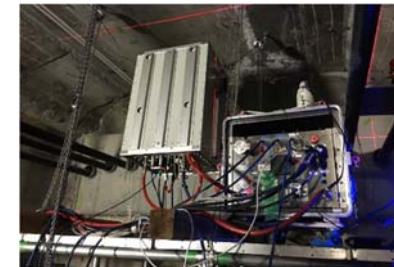


図1(a) 妙高大橋での調査（X線源）



図1(b) 宮津橋での調査（撮像中）

研究結果：水平方向2組の鋼棒とシースの結果の一例を図2(a)に、画像の強度プロファイルをプロットしたものを図2(b)に示す。強度はコンクリート、鋼棒、シース、グラウトと空気それぞれの減弱係数と厚さに依存する。状態を調査すべき鋼棒とシースの間のギャップ部はその間隔によりプロファイルが変化するのでその形状からグラウトと空気を識別することができる。

図2に妙高大橋および宮津橋で取得した撮像画像例を示す。いずれもグラウト未充填と思われる箇所である。図4は図3(b)を画像処理したもので鋼材やシースがより識別しやすくなり、その結果を踏まえ強度プロファイルの形状からグラウトの状態を診断した。ギャップが狭いため形状の相違はわずかであるが、撮像画像のシミュレーションをすることによって判別することができた。

撮像画像から診断する際に、強度プロファイルを用いてもグラウトの有無に関しての基準が明確にはなっていない。今後は精度よく診断できる技術を開発する必要があると思われる。

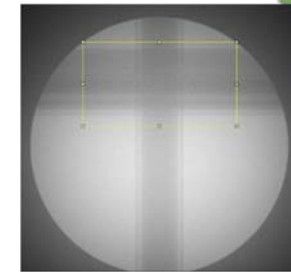


図2(a) シミュレーション撮像画像

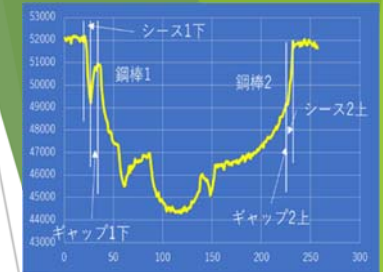


図2(b) 強度プロファイル

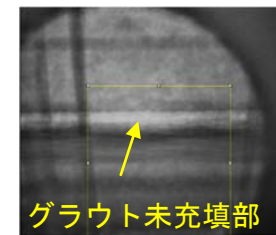


図3(a) 妙高大橋撮像画像例

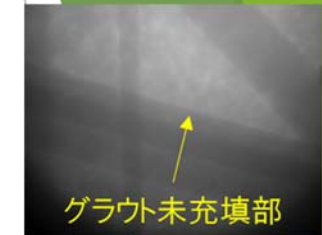


図3(b) 宮津橋撮像画像例

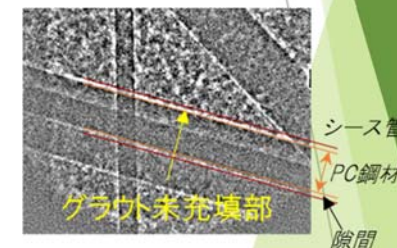


図4. 図3(b)の画像処理後の識別例。オリジナル画像と比較して識別が容易。

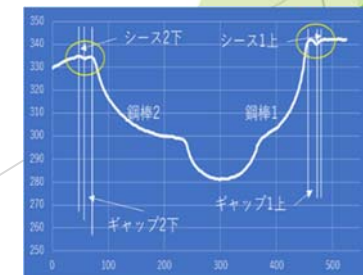


図5. 図3(b)の強度プロファイル。ギャップ部の形状から状態を判別

2022F06 土壌中での放射性核種の動態評価

○齊藤拓巳¹, 戸田賀奈子¹, 室田健人², YILDIRIM, Anil Can²,
 Koraphat, Fairat², 田中琢朗², 服部隼也², 侯 林怡², 郎 朗²
 東京大学大学院工学系研究科 ¹原子力専攻, ²原子力国際専攻

研究の背景 長期的な放射性セシウムによる汚染状態の変化を理解し, 近隣住民の被ばく低減につなげるためには, 放射性セシウムの環境動態の理解が必要である.

研究の目的 DGT (Diffusive Gradient in Thin Film)法を用い, 放射性セシウムの化学形や交換性を評価することで, その移動度や生物学的利用能を調べることを目的としている.

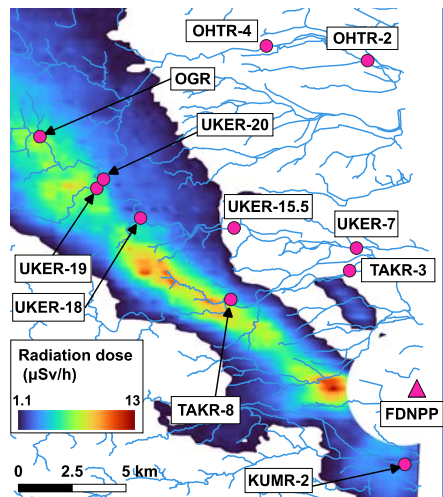


Fig. 1. DGTデバイスの設置箇所.

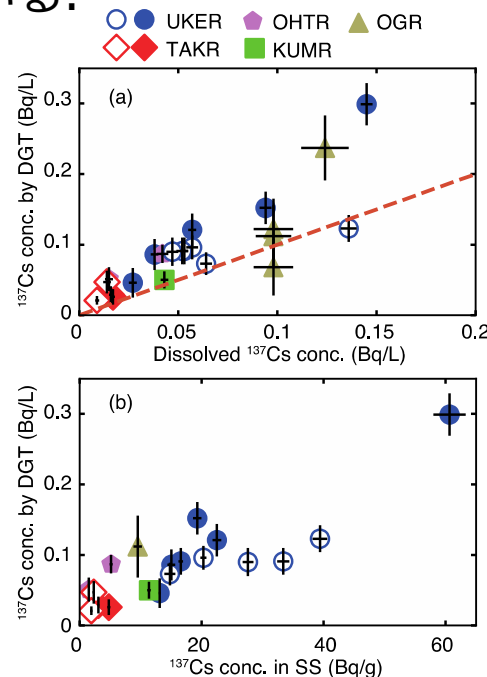


Fig. 2. ^{137}Cs の溶解態濃度(a), 及び, ^{137}Cs の懸濁態濃度(b)とDGTによる測定濃度の関係. 破線は1対1を表す線.

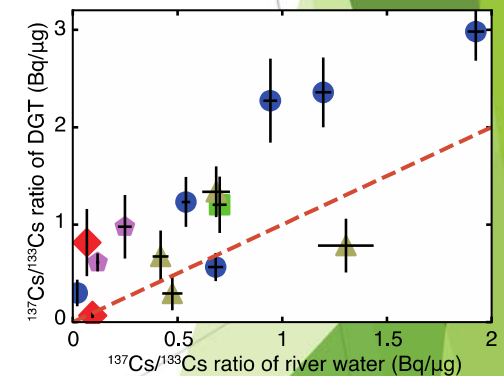


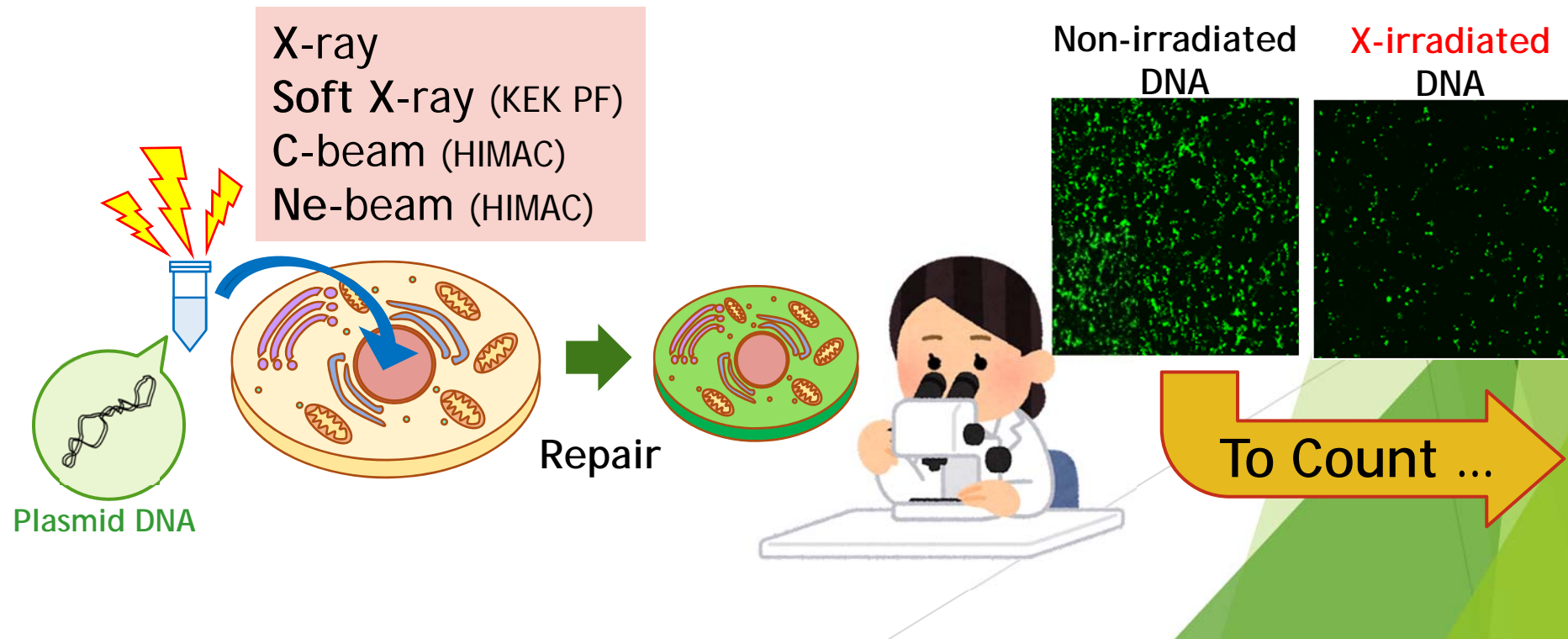
Fig. 3. 河川水中とDGT中の $^{137}\text{Cs}/^{133}\text{Cs}$ 比の関係.

放射線により誘発される難修復性DNA損傷の研究

小畑 結衣 原子力専攻・山下研究室 (Yui OBATA, YAMASHITA Lab.)

目的：放射線誘発DNA損傷の細胞内修復の難易性を定量する

概要：様々な放射線を照射したプラスミドDNAを非照射細胞にトランスフェクション(導入)してDNA修復応答の有無を顕微鏡で観察した



B₄C-SS eutectic melting and its relocation behaviour

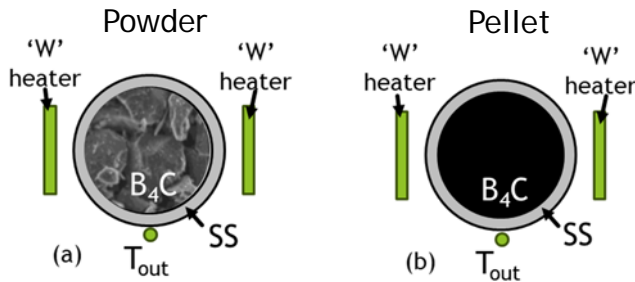
Zeeshan Ahmed, Project Researcher, Graduate School of Engineering



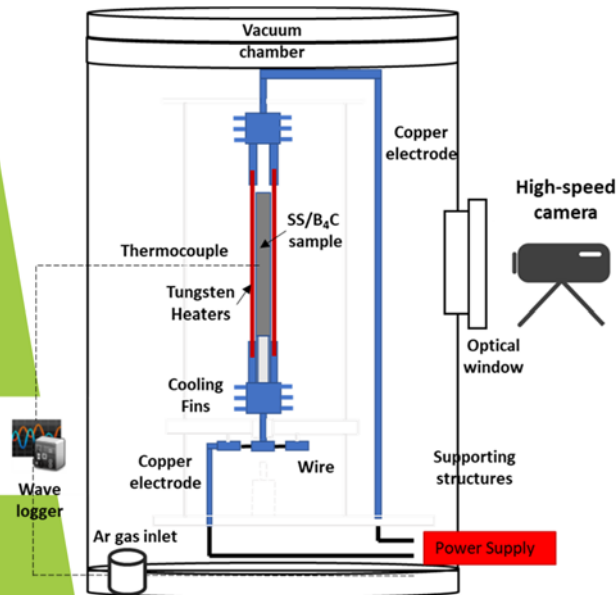
1) Purpose:

- Investigate eutectic melting of B₄C-stainless steel using Radiative Heating Method.
- Analyze its relocation behavior and determine the atomic mass% composition and phases present in the solidified eutectic melt.

2) Specimen:

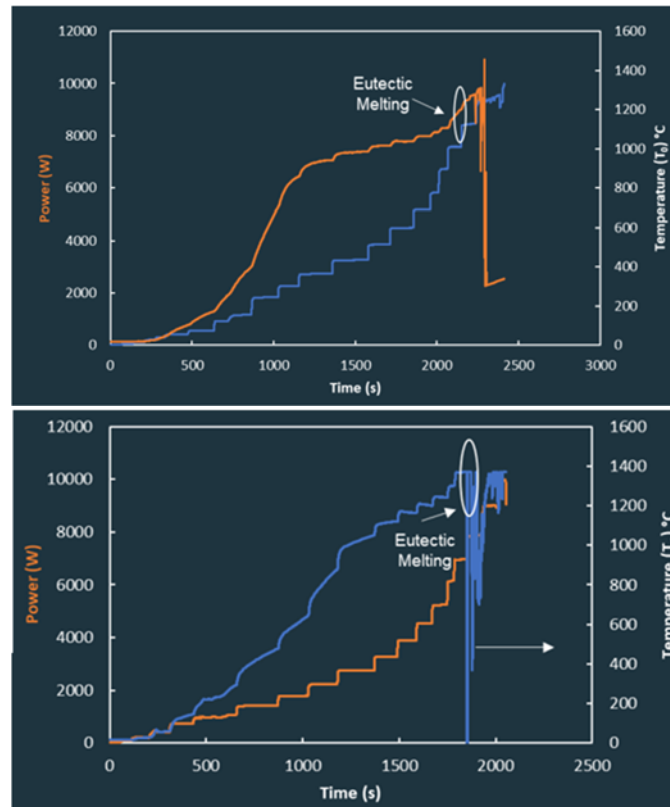


3) Experimental setup:

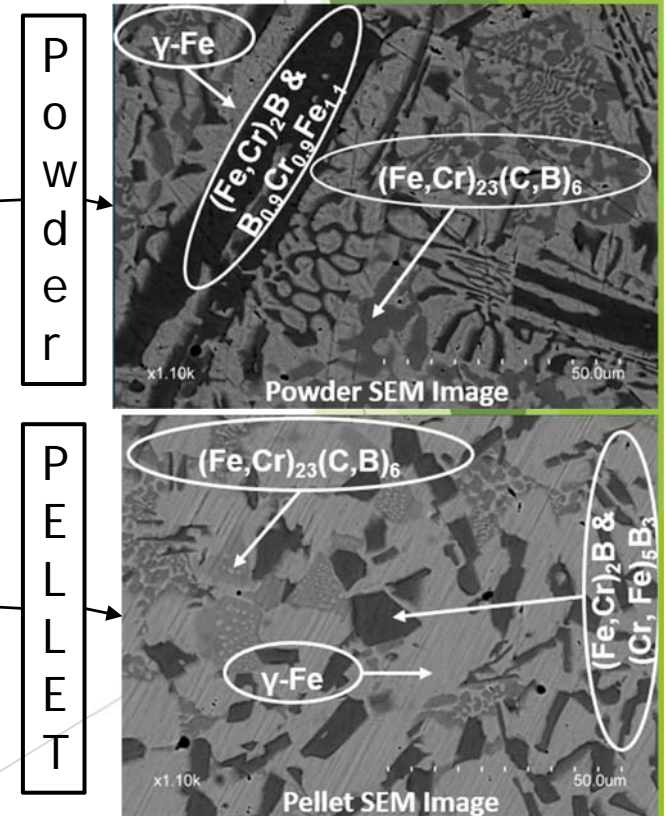


4) Results:

a) Eutectic Melting



b) SEM and Crystal phase structure



5) Future Work:

To determine the atomic mass% of Boron in solidified eutectic melt.

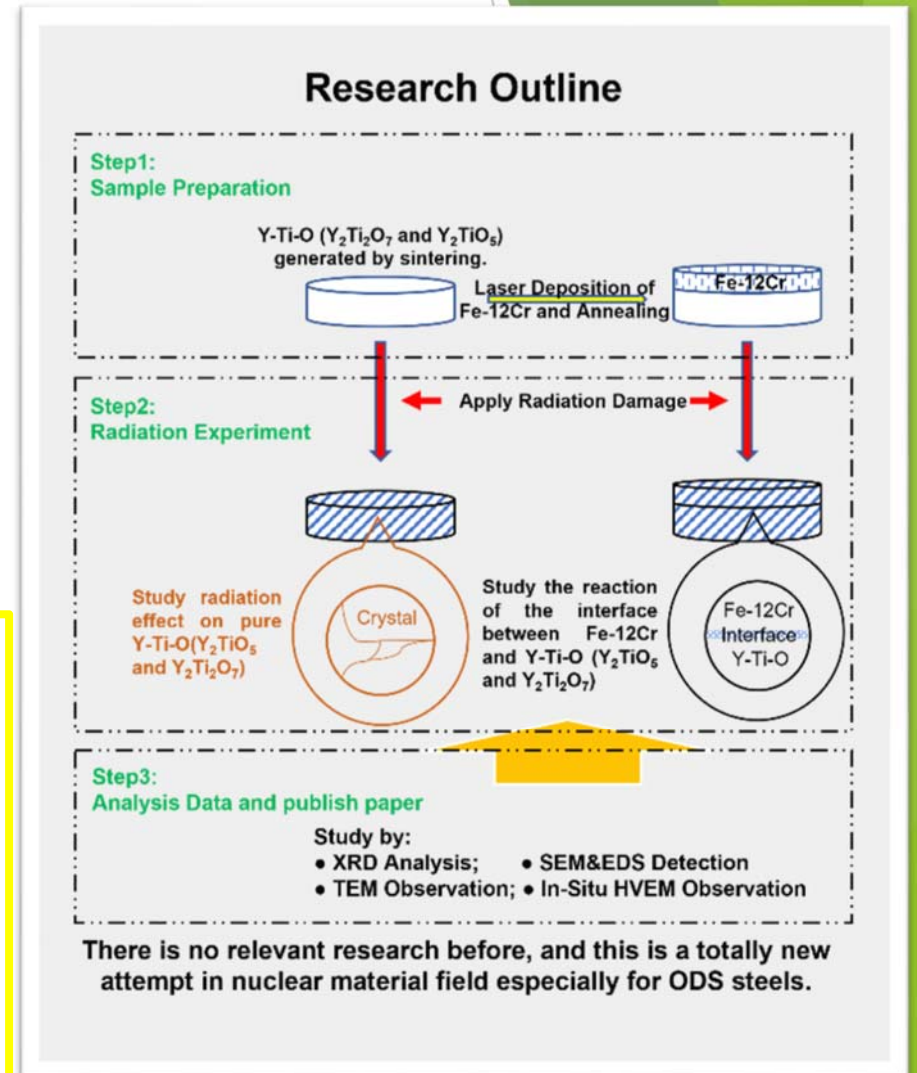
Radiation Damage Effects on Y-Ti-O nanoparticles in Fe-Cr Matrix Steels

東京大学工学系研究科原子力国際専攻 阿部研究室 HAN YI (D2)

- The development of suitable materials for next-gen fusion energy systems is a significant challenge. **Oxide Dispersion Strengthened (ODS) steels** are a prime candidate due to their radiation resistance, thanks to embedded **high-density nano-oxide particles**.
- This study aims to understand radiation-induced changes in these particles, specifically $Y_2Ti_2O_7$ nanoparticles. It also investigates the behavior of the interface between the nanoparticles and the Fe-Cr matrix under different irradiation conditions. (**show in Research Outline**)

Research Progress

1. A successful densification method has led to the creation of $Y_2Ti_2O_7$.
2. An amorphous layer was observed near the radiation surface at all temperatures; a disordered layer appeared only at 300°C and 500°C, thickest at 500°C.
3. Upcoming experiments will investigate lower radiation damage and structural transformation.
4. The Fe-Cr and $Y_2Ti_2O_7$ interface is being prepared via laser deposition.



イオン照射したODS鋼中のナノ酸化物粒子の安定性に関する研究

The Stability of Nano-Oxides in ODS Steels under Ion Irradiation

WANG ZIDENG (D1)

Abe Laboratory, Graduate School of Engineering, the University of Tokyo

[Purpose]

ODS (Oxide Dispersion Strengthened) steels are proposed to use as fusion first wall and blanket materials, as well as for fuel cladding and other structural materials for advanced gas reactor and liquid metal fast reactor concepts. In this research, irradiation with self-ion (Fe^{2+}) is applied to investigate the impact of dose gradient to the stability of nano-oxides. Ion irradiation leaves the distribution of radiation damage, i.e., the number of displacements per atom (dpa) varies along the depth direction from the irradiation surface. The dpa gradient could incur a concentration gradient of vacancies that leads to a directional vacancy-type diffusion in the material. The present study evaluated the role of such directional vacancy-type diffusion in the stability of the nano-oxide particles under different dpa gradient sampling areas.

[Experimental]

The 12Cr-ODS was conducted cold-rolling with a thickness reduction of 90% and final thickness of about 0.3 mm. Then, specimens were annealed at 1373 K for 3 h in a vacuum. Fe^{2+} ion irradiation was conducted by 2.8 MeV Fe^{2+} at 673K. The microstructure observation was conducted by a transmission electron microscope (TEM), JEM-2100, operating at 200 kV. The cross-sectional TEM foils were fabricated by a focused ion beam (FIB) system. The thickness of the specimen was measured by weak-beam dark-field (WBDF).

[Results]

The Ostwald ripening phenomena were observed in the 1.3 dpa sampling region with a 0.0072 dpa/nm. The significant growth in the particles' size for the large particles suspected to be the enhanced diffusion of a directional flow of vacancies, which were induced by the relatively high dose gradient in the local area. A severe shrinkage in the particle size occurred in the 7 dpa specimen, compared to that of the 1.3 dpa specimen. This could be attributed to the lower number density of the particles acting as defect sinks. The concentration of the vacancies in the matrix increased according to the kinetic equation, which enhanced the diffusion of constitute atoms and subsequently cause particle dissolution. In the 7 dpa region of with 0.0526 dpa/nm, the volume fraction of the nanoparticles was the lowest among the 4 sampling regions in Figure 1. It indicates the constituent atoms tend to dissolve into the matrix under such conditions. The instability of nanoparticles under intensive vacancy-type diffusion flow incurred by the high local dose gradient was verified.

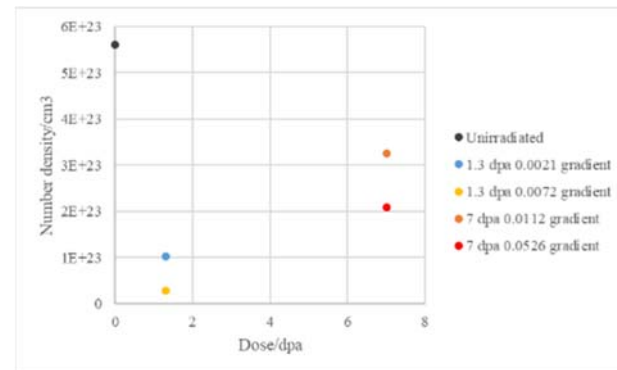


Figure 1 The evolution of the number density of the nano-oxides in the 12Cr-ODS steel under irradiation.

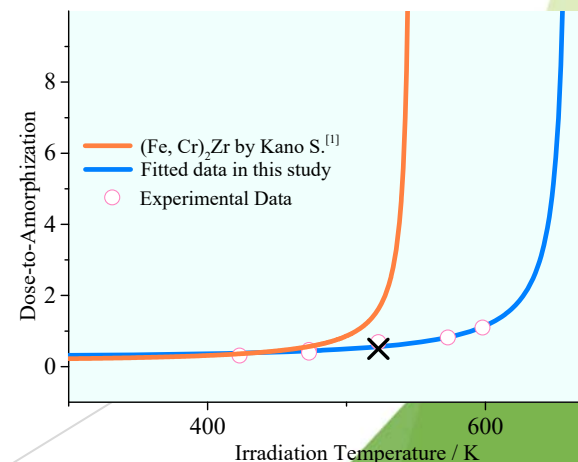
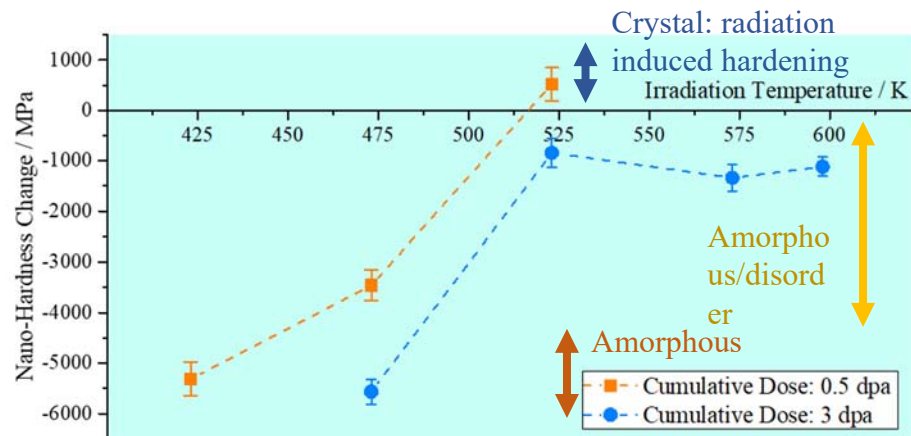
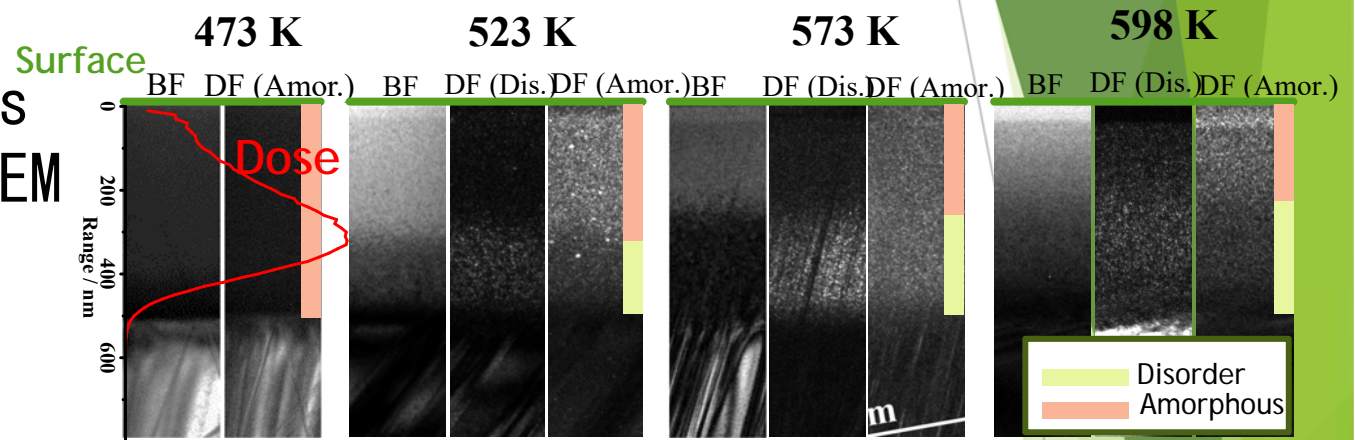
(Fe, Cr)2W ラーベス相の照射誘起不安定化現象と機械的特性変化

YANG Zongda 東京大学

☆目的 : To explore the mechanical property change and to explore the irradiation induced phase instability

☆研究の概要 :

- (1) Synthesis of Laves
- (2) Cross-sectional TEM
- (3) nano-hardness.



「中性子の特性を応用したイメージング手法の高度化」

大平直也、伊藤大介、齊藤泰司 京都大学複合原子力科学研究所

目的

中性子は特定の物質（水、ホウ素、カドミウムなど）に強く反応する一方で、金属などほかの物質に対して透過しやすい性質を持つ。そのため、中性子を利用したイメージングは、X線イメージングと相補的な情報が得られるものの、未だ発展途上の技術である。本研究では中性子の特性を応用したイメージング手法の高度化を目指す。

研究概要

本研究では、中性子を用いた以下3つのイメージング手法に注目し、それぞれの高度化を目指している。

1. 定常中性子源を用いたダイナミックイメージング

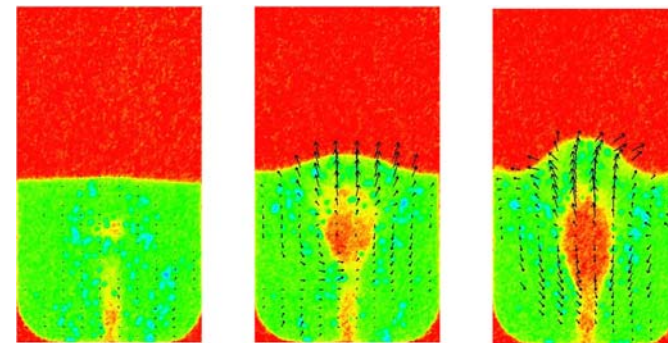
高速度撮像では、システム最適化およびレーザー粒子を用いた動的観察手法の高度化を行っている。

2. 中性子CT

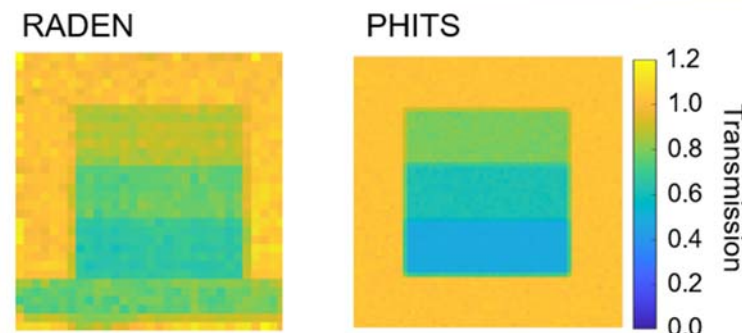
中性子CTでは、測定時間短縮のための高速度CT法の可能性について検討している。

3. 高速中性子を用いたイメージング

高速中性子を利用したイメージングのための検討および計算(PHITS)と実験(J-PARC)を合わせて実用性の検討を行っている。



SUS球による流動層の可視化・解析結果



鉄ステップ (t 10-30mm) の高速中性子 (1MeV~) 透過像
左: RADENでの実験結果、右: PHITSの計算結果

インド型イネ品種IR24へのイオンビーム照射による突然変異誘発 ～特に白葉枯病抵抗性について～

高橋 龍成¹, 前田 幸暉浩¹, 加藤 神成流¹, 柴田 雪花¹,
瀧山 祐樹², 山本 雅史³, 吉田 理一郎³, 岡本 繁久³, 内海 俊樹⁴,
玉置 尚徳³, 志水 勝好³, 清水 圭一³, 尾上 昌平⁵, 二神 泰基³, 田浦 悟⁶, 一谷 勝之³

¹ 鹿児島大学農林水産学研究科,² 鹿児島県農業開発総合センター徳之島支場,
³ 鹿児島大学農学部,⁴ 鹿児島大学理学部,
⁵ 鹿児島大学先端科学研究推進センター技術部(アイソトープ実験部門),
⁶ 鹿児島大学遺伝子実験施設

☆目的

本研究の目的は、イオンビーム照射によるイネ白葉枯病新規抵抗性系統の作出である。
当研究室では、NMU処理によって作出されたイネ白葉枯病抵抗性系統を所有している。
しかし、NMU処理による抵抗性変異体の発現率が低かった。
そのため、変異率が高いとされているイオンビームを用いて新規抵抗性系統を作出する。

☆研究の概要

白葉枯病とは

*Xanthomonas oryzae pv. oryzae*によって引き起こされる病気。植物の細菌病の中で4番目に重要な病気とされている (Mansfield et al. 2012)。対策には、抵抗性遺伝子の活用が有効とされている。

IR24とは

インド型イネ品種で、白葉枯病に対しては全ての菌株に対して感受性を示す。

2019年～M₁世代の育成～

- ・ IR24にイオンビーム¹²C⁵⁺ 220MeVを10, 15, 20, 25 グレイ(Gy)照射。
- ・ 主稈に着いた穂を収穫→種子稔性調査

2020年～M₂世代の選抜～

- ・ 播種後に葉色変異体の観察→種子稔性と突然変異出現率の関連を調査
- ・ 穂ばらみ期にイネ白葉枯病菌を剪葉法で接種
- ・ 病斑の伸びが抑制された系統の種子を収穫

2021年～M₃世代の選抜～

- ・ 病斑の伸びが抑制された系統を再度供試
- ・ 病斑の伸びが抑制された系統を選抜
- ・ 選抜した個体の病斑長と稈長・穂数を測定

2022年～M₄世代の複数菌株に対する抵抗性評価～

- ・ 2021年に選抜した7系統を供試
- ・ 日本産イネ白葉枯病菌 I～V 群菌を剪葉法で接種
- ・ 選抜した個体の病斑長と稈長・穂数を測定

Table 1. NMU処理によって得られた抵抗性系統の説明

系統名	XM5	XM6	XM14
抵抗性遺伝子	<i>xa19</i>	<i>xa20</i>	<i>xa42</i>
白葉枯病に対する反応	全ての菌株に 抵抗性	全ての菌株に 抵抗性	全ての菌株に 抵抗性

Fig.1) 病斑長比較の写真

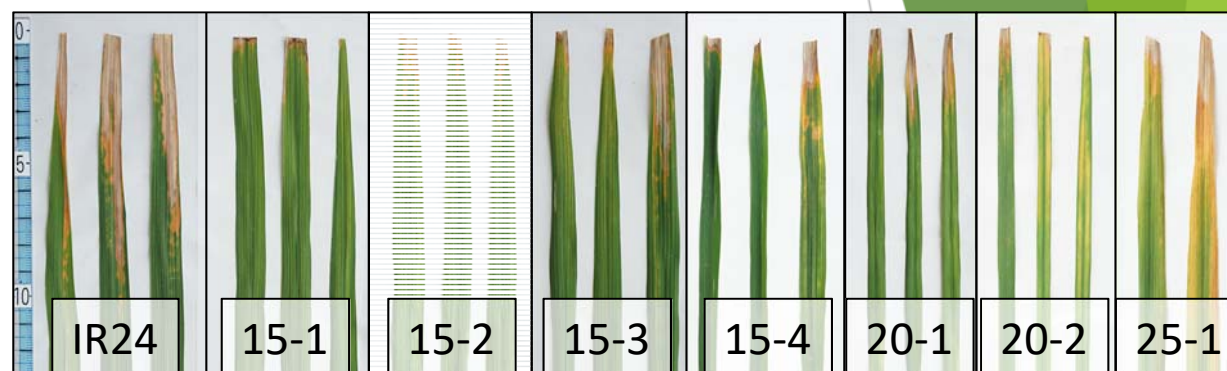
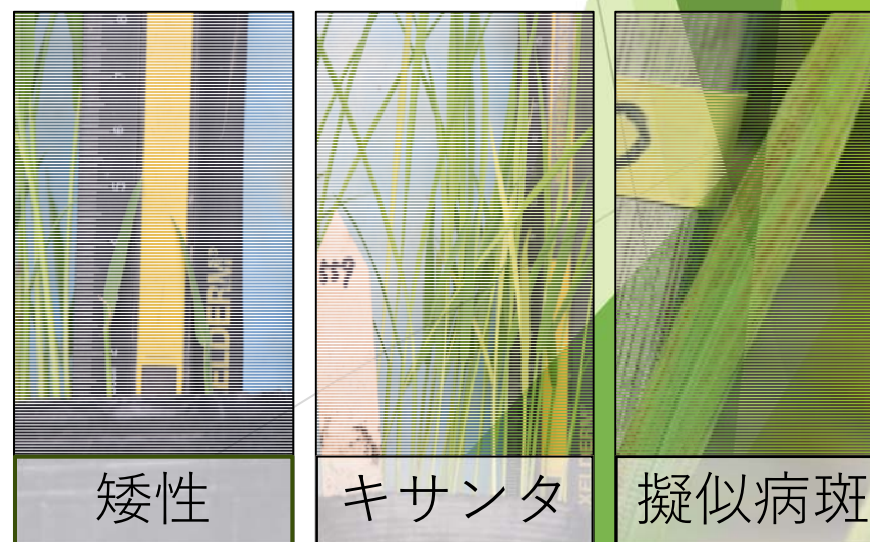


Fig.2) 葉色変異体の写真



中性子ラジオグラフィーを用いた原発性肝臓癌に対する中性子捕捉療法に応用するボロンデリバリーシステムとボロン化合物の探索的研究

柳衛宏宣 東京大学大学院工学系研究科 総合研究機構 /
新潟薬科大学 医療技術学部

☆目的：中性子捕捉療法（Boron Neutron Capture Therapy ; BNCT）とは、腫瘍部にボロン(^{10}B)元素を集積させ、熱中性子照射で生じる原子核反応 ($^{10}\text{B} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^4_2\text{He} + ^7_3\text{Li} + 2.31\text{MeV}$) で放出される α 粒子および ^7Li 粒子を用いて、悪性腫瘍を破壊する細胞内内部照射がん治療法である。BNCTが腫瘍部以外の正常組織を障害することなく有効であるためには、生体内に投与された ^{10}B 原子が確実に腫瘍局所に送達され、かつ限定されるような ^{10}B デリバリー薬剤の開発が必要である。

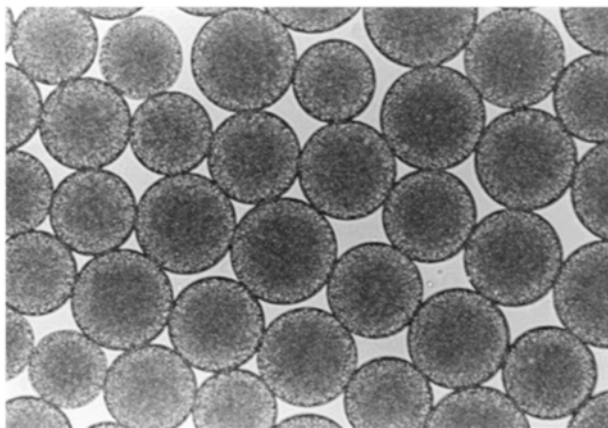


Figure1. Microphotograph of WOW emulsion. : Inner water droplets containing drug are observed as countless small dots in each oil particle.

WOWエマルションでは、シラス多孔質ガラス膜を用いた二段膜乳化法により、従来のリピオドールを均一なサイズと封入効率を格段に高めることができる。

今回、我々は、JRR3における熱中性子照射再開に際し、再発肝臓癌への応用に向けたボロン封入 Water-in-Oil-in-Water emulsion (WOWエマルション)の腫瘍内集積性のイメージングを行い、癌集積性を検討したので報告する。

☆研究の概要

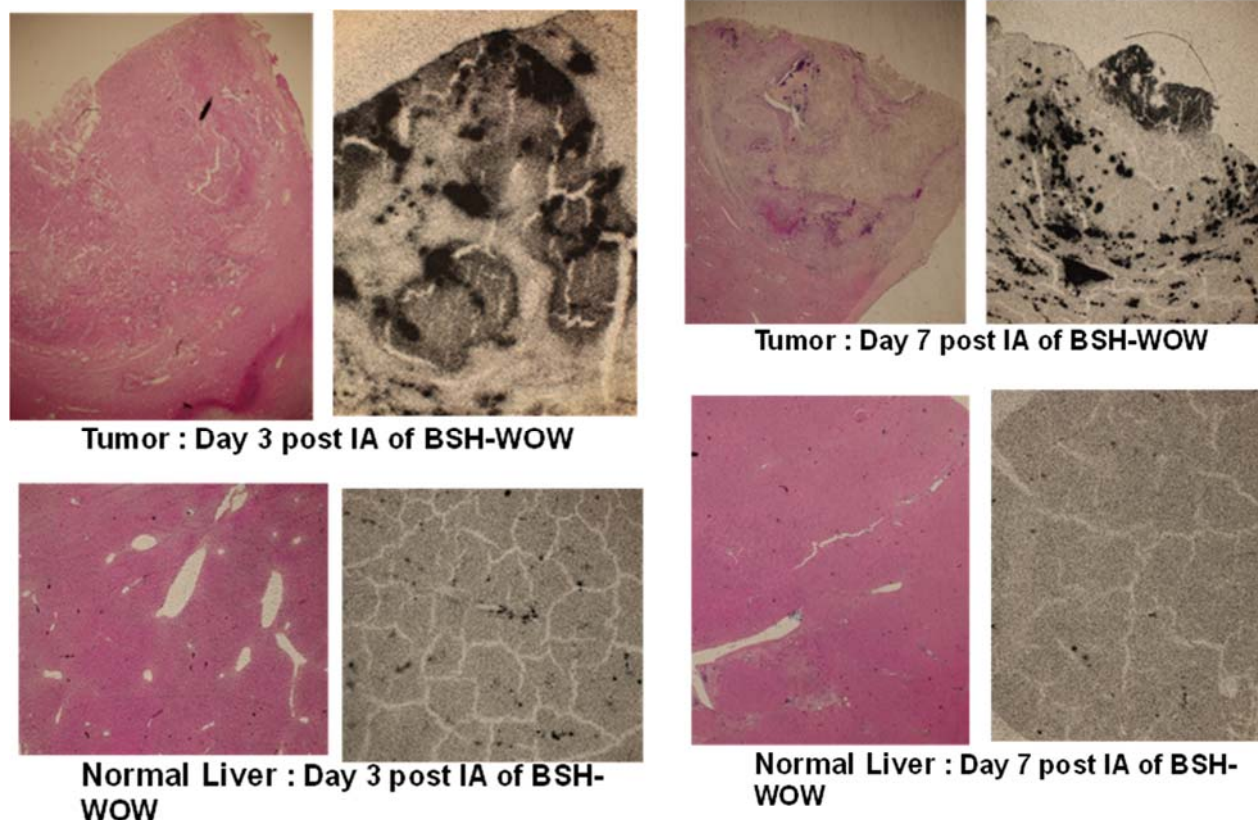


Figure 2. Neutron capture Auto-radiography and HE staining of VX-2 tumor tissues and normal liver tissues after intra-arterial injection of ^{10}B SH entrapped WOW emulsion (^{10}B SH-WOW). The magnitude is x12.5.

中性子ラジオグラフィを用いた腫瘍組織と ^{10}B 原子集積性の解析：
 中性子ラジオグラフィによるボロン(^{10}B SH)封入WOWエマルジョンによる腫瘍集積性の確認： VX-2肝腫瘍モデルにおいて ^{10}B SH封入WOWエマルジョンを肝動注し、投与3日、7日後の腫瘍集積性を検討すると、 ^{10}B SH封入WOWエマルジョン投与群は、優位に腫瘍内の貯留性を示した。投与3日目以降の正常肝組織でのエッチピットは少なく、フラッシュアウトされ、集積は少ないと考えられた。

結語： ^{10}B SH封入WOWエマルジョンを動脈投与後、腫瘍組織内に選択的にボロン原子を集積できることを中性子ラジオグラフィを用いて証明できた。今後、原発性肝細胞癌に対する ^{10}B 化合物封入WOWエマルジョンの肝動注を用いた中性子捕捉療法を展開するにあたり、癌細胞への2次ボロンデリバリーが可能な新規 ^{10}B 化合物・複合体をNCARを用いて検討していきたい。