

第 58 回放射線科学研究会 聴講記

標記研究会は平成27年10月16日（金）午後1時半から5時半まで住友クラブにおいて、秋吉 優史氏（大阪府立大学）、中川 貴氏（大阪大学大学院）、田中 浩基氏（京都大学）、鬼柳 善明氏（名古屋大学大学院）の4名の講師をお招きして開催された。27名の参加者が熱心に聴講し、活発な質疑応答が行われた。

座長は前半2件を、前半2件を岩瀬 彰宏氏（大阪府立大学）が、後半2件を大嶋 隆一郎ONSA専務理事が務めた。なお、講演会終了後、講師の先生方を囲んで技術交流会が行われた。

1. 核融合炉材料開発の現状 ～ 微小試験片による熱拡散率測定技術開発

大阪府立大学地域連携研究機構

放射線研究センター 准教授 秋吉 優史

講師は、長年、核融合炉材料の照射効果に関する研究をやっ
てこられている。今回は、ダイバータ材料として使われる可能性のあるセラミックス材料の熱物性が中性子照射によってどう変化するか、またそのためのいろいろな実験的工夫に絞って講演をいただいた。

核融合炉は、現在 ITER 国際プロジェクトなどにより、様々な分野からの開発が進められている。過酷な放射線環境下に耐える材料開発も重要な研究分野である。ダイバータは、核融合プラズマ中に発生するヘリウムや酸素などのイオン化不純物を除去するための装置で、それを形成する材料は、極めて高い熱負荷を受ける。そのために、ダイバータ材料の熱物性評価、特に、放射線（中性子）照射環境下での熱物性変化を評価することは大変重要であり、内外の専門家の間ではその重要性が認識されているにもかかわらず、ほとんど行われていないのが現状である。

講演では、ダイバータ材として検討されている各種セラミックス材料における熱伝導機構、その測定法と、原子炉照射によって得られた照射の効果、炉心体積の制限ゆえの問題である微小試験片の必要性とそれをういた評価法の確立、といった流れで、わかりやすい解説をしていただいた。

一般に物質の熱伝導は電子と格子振動（フォノン）によってもたらされるが、絶縁体であるセラミックスの場合は、フォノンによって熱伝導が行われる。中性子照射により格子欠陥が導入されると、それによるフォノン散乱が起き、平均自由行程が減少し、熱伝導が低下し、ダイバータ材料の熱物性に大きな影響を及ぼすことになる（詳細は図 2 を参照のこと）。次に、熱伝導率測定法の説明があった。本研究では、測定時間が短く測定時の温度上昇の小さいレーザーフラッシュ法を採用している。レーザーフラッシュ法は、固体表面にレーザーによって熱を与え、それによる裏面の温度上昇を熱電対などによって観測し、熱拡散率や比熱などの熱物性を測定する方法である。講演者らは、高速増殖炉「常陽」を用いて中性子照射を行った様々なセラミックス材料 (Al_2O_3 、 AlN 、 Si_3N_4 、 SiC) の熱拡散率変化をレーザー



図 1 講演中の秋吉講師

フラッシュ法を用いて測定している。いろいろな照射量、照射温度に対する熱拡散率の測定データを基に、照射時熱拡散率と照射温度との相関を示す貴重なデータが得られている。それによると、照射時熱拡散率は、いずれの試料においても照射温度に依存せず、ほぼ一定の値になることが分かった。しかし、細かく見ると、Al₂O₃、AlN では、照射温度とともに照射時熱拡散率は若干上昇し、反対に SiC では若干の低下を示している。

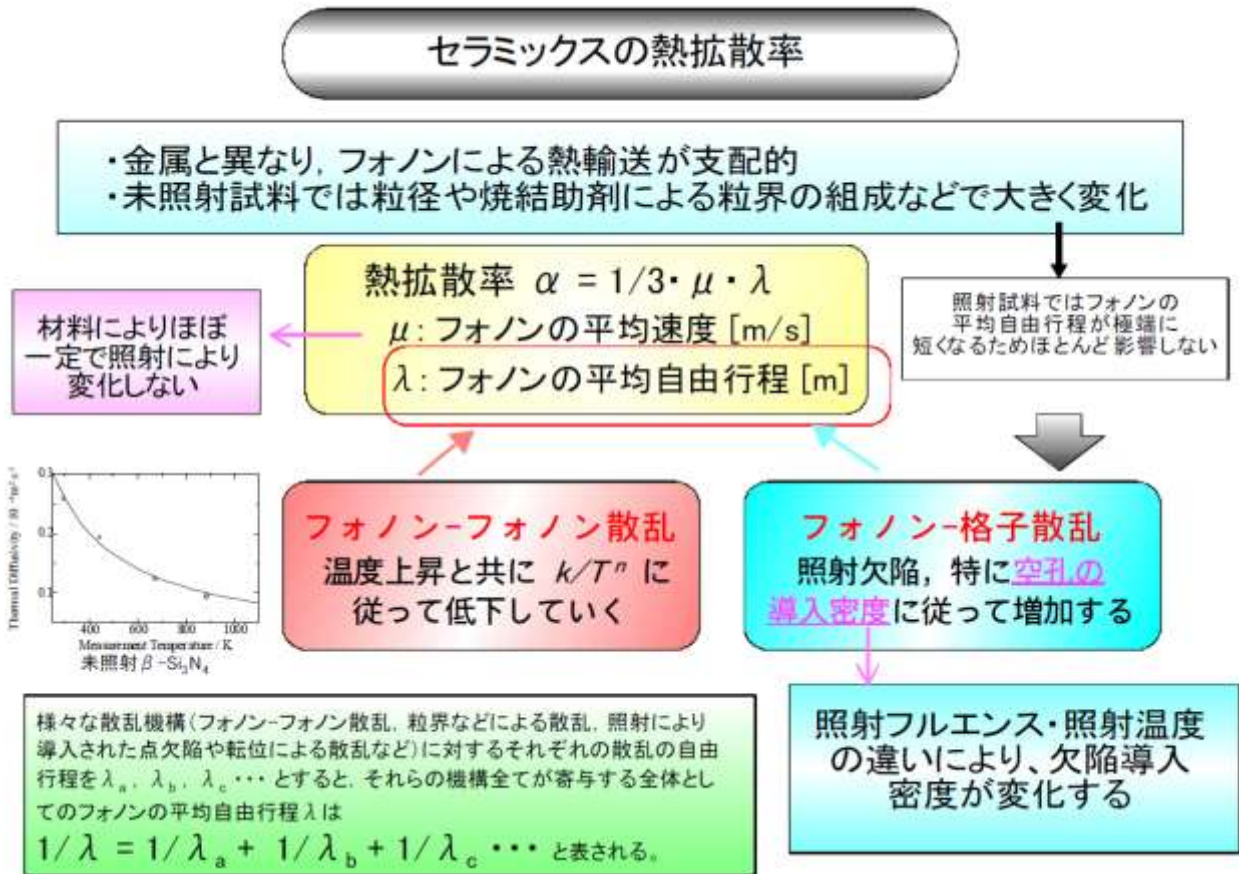


図2 セラミックスの熱伝導

さて、日米での工学的評価プロジェクト (PHENIX) では、米国 ORNL 研究所の研究炉 HFIR で中性子照射を行う計画であるが、炉心の体積が限られていることや、試料の放射能低減、照射時のガンマ発熱の抑制などの点から、照射試料を微小化する必要がある。そこで、講演の最後に、微小試験片を用いた熱拡散率評価法の確立に関する話をいただいた。通常、レーザーフラッシュ法による測定標準試料の大きさは直径 10mm、厚さ 2mm 程度であるが、以上の観点から、HFIR を用いた照射では直径 3mm、厚さ 0.5mm という大きさの試験片を用いた測定が必要となる。このような微小試験片を用いた熱拡散率測定のために基礎的データの収集は完了しているが、正確な評価法は必ずしも確立していない。このため、以下のような方法により、微小試験片による正確な測定法の確立を目指している。1) 大きさを直径 3mm、厚さ 0.5mm に固定して、熱拡散率の異なる試料を測定することによって補正式を得る、2) 直径 3mm でいろいろな厚さの試料における測定を実施して、厚さによる補正式を得る、3) データ解析の際に、従来の $t_{1/2}$ 法を用いずに、温度上昇曲線そのものを解析して、より正確な解析方法を検討する。さらには、産業技術総合研究所・計量標準総合センターの協力も得ながら、微小試験片における熱拡散率測定に関して、より正確な解析モデルを検討していく予定、ということである。

秋吉講師は、本年 4 月に大阪府立大学放射線研究センターに赴任されたばかりなので、その研究紹介

という意味でも今回の講演は、大変よい機会であったと思う。

(岩瀬彰宏記)

2. 磁気ハイパーサーミア療法の確立にむけて

大阪大学大学院工学研究科 准教授 中川 貴

ハイパーサーミア療法とは、体内の腫瘍部を細胞が死滅する高温に加熱して、がん細胞を選択的に殺傷する治療法である。この療法は、外科的施術が不要で副作用が少ないこと、放射線療法や化学療法との併用により、より高い治療効果が得られるなど、近年その認知度が急速に高まっている有望な治療法である。しかし、正常細胞に対するダメージを回避し、がん細胞だけを死滅させるためには体内での微妙な温度制御が必要である。このため、近年、磁性を帯びた物質をがん腫瘍部に集積させ、体外からの高周波磁場によって腫瘍部のみを加熱する方法（磁気ハイパーサーミア療法）が有望となり、それに関する基礎研究が活発に行われるようになってきている。本講演では、講演者が精力的に行っている様々な発熱体の開発と、人体が入ることのできる臨床用磁場発生装置の設計という2つのテーマについて、研究の現状を語っていただいた。



図1 講演中の中川講師

まず磁気ハイパーサーミア用として3種類の発熱体の紹介があった。その1つが、磁性ナノ粒子である。磁性酸化鉄ナノ粒子からなる Resovist が MRI 造影剤として薬剤認可されているため、この磁性ナノ粒子の磁気ハイパーサーミア発熱体としての研究が盛んに行われている。磁性ナノ粒子の発熱の理論式によれば、一定の外部磁場周波数に対して発熱量が最大となる粒子径があることになる。ところが、磁性ナノ粒子分散液を希釈するだけで単位質量あたりの発熱量が変化する場面があることが見出された。そこで、磁気モーメント分布を2つや3つの山を持つ分布関数であらわすことにより、分散液希釈による発熱挙動を再現することができた。

2つ目の発熱体として密封小線源の紹介があった。磁気ハイパーサーミアを早く臨床に応用するためには、すでに臨床で使われている機器を利用するのがよい。そこで講演者らは、前立腺がん治療用線源である、I-125 が封じこまれている直径 0.8mm、長さ 4.5mm の Ti 製カプセルに着目した。模擬環境（模擬 Ti 針と前立腺を模擬したポリアクリルアミドゲル）を用いて発熱特性を測定したところ、ある交流磁場下において、周辺部は 42℃以下に保ちながら、中心部は、がん殺傷効果を示す 43℃という温度が達成できることが分かった。さらに、マウス

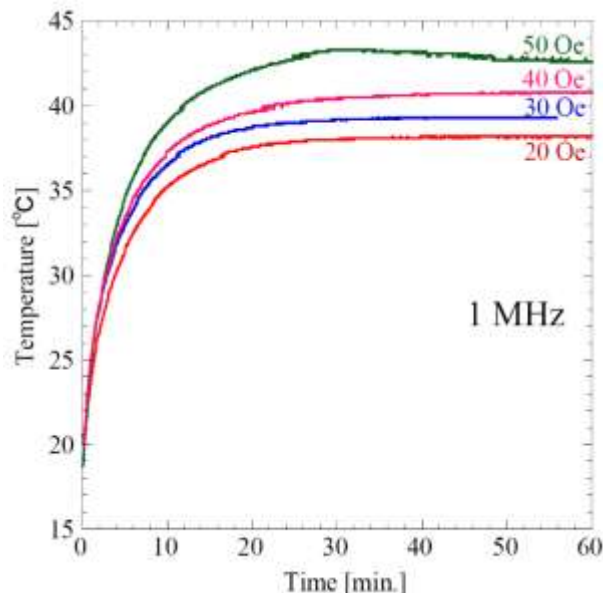


図2 $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{Mn}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_3$ ($X=0.044$) の交流磁場下 (1MHz) での温度変化

の腫瘍部における加熱実験も行い、生体内でも 42.5℃の加熱が起きることも確認した。このように、すでにがんの放射線治療に用いられている密封小線源もハイパーサーミア発熱体として利用できることがわかり、放射線照射と加温という、治療効果のより高い併用療法を新たな療法として提案しているということである。

3 つ目の発熱体として、自己温度制御型発熱体を挙げた。磁気ハイパーサーミア療法では、温度の制御が非常に重要である。そこで、ある温度以上では発熱しなくなる発熱体の利用が考えられる。LaSrMnCuO は室温付近にキュリー点を持つ磁性体であり、この材料を用いれば、キュリー温度以下では交流磁場中で発熱し、それ以上の温度では発熱しなくなる。しかも、この材料は、Cu の組成とともにキュリー点が直線的に低下するため、容易にキュリー点（すなわち発熱温度）を制御できる、実際、図 2 で示すように、発熱温度は時間とともに一定値となり、しかも外部磁場強度が 20 Oe-rms と 50 Oe-rms でわずか 4℃しか異ならない。このように、キュリー点付近で急激に磁化が消失する磁性体は、磁場強度に発熱特性が依存しない自己温度制御型磁気ハイパーサーミア用発熱体として大いに期待できる。

最後に、磁気ハイパーサーミア療法に不可欠な臨床用磁場発生装置の開発に関する説明があった。現在、磁気ハイパーサーミア療法の基礎研究に供される高周波磁場発生装置は、直径が数 cm 以下のコイルでできているため、体内深部の臓器の治療を実現するためには、大型の磁場発生装置の開発が必要となる。その 1 つとして、フェライトコアを用い、コアのギャップ間に磁場を発生する方法がある。ギャップ間に人が入り磁場を印加する配置となるため、ギャップ長は 300mm 必要である。図 3、4 に臨床用に設計している交流磁場発生装置のイメージ図を示す。1MHz の磁場で、療法に必要な 45-50 Oe-rms の磁場が広い範囲で得られることがわかる。

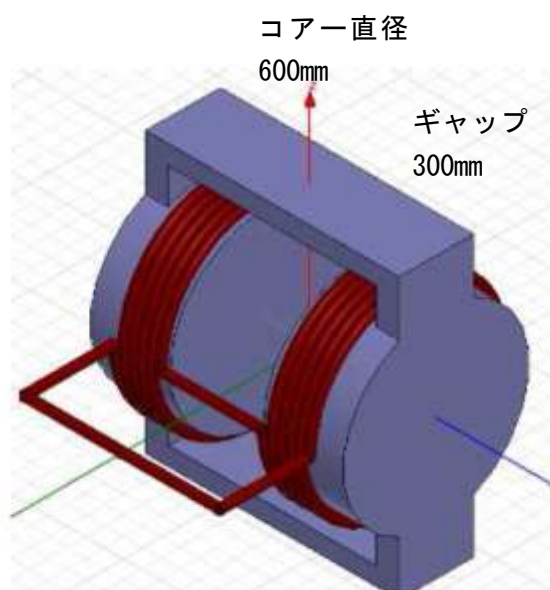


図 3 臨床用に設計している交流磁場発生装置の概略

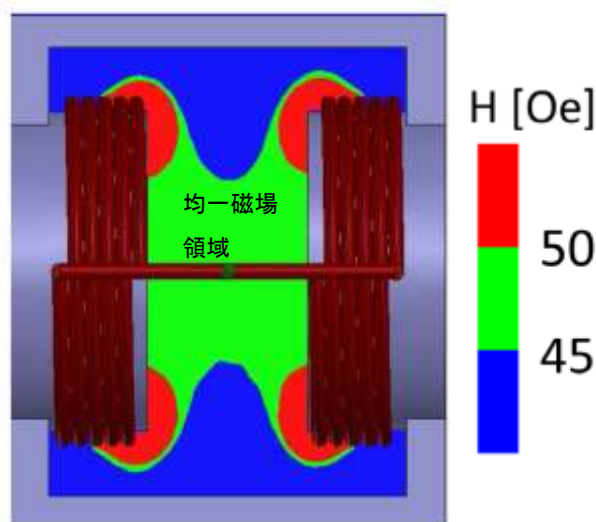


図 4 ギャップ長が 300mm でフェライトコア直径 600mm の磁場発生装置で磁場強度が 45-50 Oe-rms である範囲（均一磁場領域）

以上のように、がん治療に有望なハイパーサーミア療法において、発熱体や磁場発生装置の開発は進んでいるが、生体適応性が高く発熱効率の良い発熱体の開発のための研究がさらに必要であり、また、それに並行して、交流磁場発生装置の検討も重要であると強調されて講演を締めくくられた。

(岩瀬彰宏記)

3. ホウ素中性子捕捉療法のためのサイクロトロンを用いた加速器中性子源

京都大学 原子炉実験所 特定准教授 田中 浩基

最初にホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の原理、歴史から講演が始まった。BNCTは、比較的エネルギーの低い熱中性子線のがん組織に照射し、予めがん組織に取り込ませたホウ素 (^{10}B) 化合物との核反応によって生成する α 線とリチウム核 (^7Li) によって、選択的にがん細胞を殺すことができる、副作用のきわめて少ない治療法である。日本におけるBNCTの先駆者は畠中坦 (ひろし) 教授である。彼は東京大学助手時代にハーバード大学に留学しBNCTを習得した。帰国後東大弥生炉、日立の研究炉等でBSH (borocaptate sodium) を用いて1968年から臨床実験を開始している。



図1 講演中の田中講師

京都大学原子炉実験所の研究用原子炉 (京大炉) におけるBNCTの臨床研究の開始は1974年である。1987年にはホウ素薬品BPA (para-boronophenylalanine) を用いた臨床実験が神戸大学の三島教授により開始した。その後PETの主成分である18Fを添加した18F-BPAにより、薬剤を投与した後、その蓄積場所がPETにより直接観察することも可能になった。1996年に重水設備が改修されたため、熱外中性子の使用が可能になり人体の奥5cmでも表面とほぼ同じ中性子反応が得られるようになった。脳腫瘍では3年の寿命が治療により倍以上になり、その他悪性黒色腫、再発頭頸部がん、悪性胸膜中皮腫などでは効果を挙げてきた。しかし延命効果が顕著になるに従って、他の放射線治療と同じであるが、脊髄への転移などがみられるようになったそうである。世界で1000例の内半分は京大炉の治験である。京大炉が休止中であるので、現在稼働しているのは台湾の原子炉だけであったが、最近アルゼンチンや中国でも治験が始まったとの報道があったそうである。

中性子捕捉療法は中性子源とその線質、薬物の2つが大切である。京大炉におけるBNCTは、中性子源として5MWの原子炉を用いて行われてきた。しかしその治療法を広めるには原子炉しか利用できないことは大きな制限となる。そのために加速器駆動中性子源が提案された。表1に中性子源としての原子炉と加速器の比較を示す。

加速器中性子源で考慮すべき項目としては、①ターゲットでの熱除去、②ターゲットのブリスタリング、③放射化、④生成中性子量、⑤減速体系の設計等である。図2に加速器駆動中性子源の模式図を、表2に中性子源のターゲット材料の比較を示す。京大原子炉実験所ではターゲットをBeにして陽子の加速電圧を30MeVとしたCyclotron Based Epithermal Neutron Source

表1 中性子源としての原子炉と加速器の比較

項目	原子炉中性子源	加速器中性子源
中性子発生反応	^{235}U (n, fission)	^7Li (p, n) ^7Be ^9Be (p, n) ^9B Ta (p, xn)
線源形状・角度分布	体積線源・等方	面線源・角度分布有
時間的安定性	連続運転中は極めて安定	加速器の電流値に依存
出力	100kW~	核反応に依存
設置	病院併設困難	病院併設可能

(C-BENS)を開発した。これは陽子線のブラックピークをBeの外の冷却水へ持つていくと同時に、低エネルギー例えば4 MeVの陽子エネルギー時よりも50倍となる中性子発生率を優先したためである。更にPb、Feにより高速中性子を減速し、AlとFを用いて熱外中性子の生成を図り、ポリエチレンで高速中性子の遮蔽を行っている。2007年8月に京大原子炉実験所と住友重機械工業との共同研究

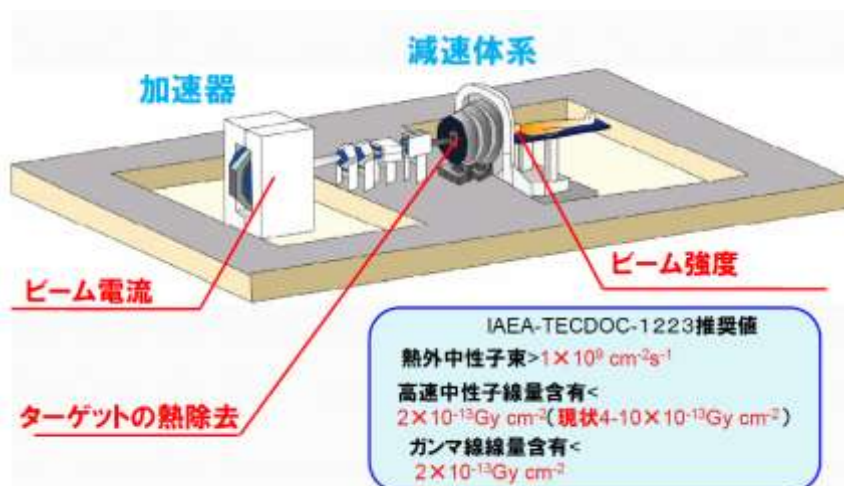


図2 加速器駆動中性子源の原理

が開始し、2008年12月にC-BENSインストール、2009年3月に中性子発生試験開始、施設検査合格、2012年10月に再発脳腫瘍に対する治験、2014年4月に頭頸部がんに対する治験と順調に進んでいる。

最後に京大の協力のもとにBNCT施設が建設された郡山市の総合南東北病院の紹介があった。既に2015年4月にはビーム増強テストが開始されている。施設は構造的にもまた材料的にも、例えばLiF入りのポリエチレンの使用によるγ線の低減、中性子吸収コンクリートの使用による患者と作業従事者の被曝の低減等が図られ、原子炉実験所の装置より改良されている。

表2 各種の中性子源としてのターゲットの比較

Reaction	Proton Energy Ep	Yield (Neutron/Proton)	Melting	Conductivity (W/m/K)	Neutron Energy	Moderator Size
${}^7\text{Li} (p,n) {}^7\text{Be}$	2.5	1.46×10^{-4}	180	84.7	0.1~0.5MeV	小
${}^9\text{Be} (p, n) {}^9\text{B}$	4	1.6×10^{-4}	1278	201	陽子エネルギーに依存	大
${}^9\text{Be} (p, n) {}^9\text{B}$	30	3.0×10^{-2}	1278	201	陽子エネルギーに依存	大
$\text{Ta} (p,xn)$	50	7.0×10^{-2}	3017	57.5	陽子エネルギーに依存	大

質問では肺がんの結果についてあり、放射線肺炎を避けるために5Grとしたが足らなかったため今後7.5Grまで上げる予定とのこと。原子炉実験所で治療を受けるには、

外部の幾つかの病院が窓口であること、例えば再発脳腫瘍の場合は大阪医科大学。早期の京大炉の稼働が望まれる、そのためにはもっと行動する必要があるのではないかとの意見が出された。

高度な医療を行うためには医師の技術だけでなく、使用する装置の汎用化も必要である。原子炉でしか行うことのできなかつたBNCTを、加速器駆動中性子源を開発して世の中に広めようとする田中講師の研究は、日本人の半分近くががんに罹る現在、非常に重要である。BNCTの普及を目指す田中講師の今後の活躍に期待したい。

(義家敏正 記)

4. 加速器中性子源の産業利用に向けた応用

名古屋大学大学院工学研究科 特任教授 鬼柳 善明

今プロジェクターで映し出された画面をみると、タイトルの「産業利用に向けた応用」というのは少し変であることに気づいたというコメントから話が始まった。最初に講師が長年関与したJ-PARCの紹介がなされた。中でも捕獲断面積測定装置ANNRI（2008年完成）と中性子ラジオグラフィ装置RADEN（2014年完成）は講師が代表者として製作したものである。特に当日の話のメインであるRADENは北海道大学の小型中性子源(HUNS)での基礎研究を基に製作された、強力なパルス中性子イメージング用装置であり、平成26年11月7日に初ビームが得られた。



図1 講演中の鬼柳講師

日本の中性子源としてはJ-PARCを含めて7個あるが、RADENの中性子強度はJRR-3とほぼ同等である。大強度だけでなく小型の中性子源が各所にあることは、小型でテスト的な新しい実験を実施し、大型で更に進んだ実験、大強度が必要な実験という具合に使い分けることができるという利点がある。

中性子イメージングの最近の動向として、①極端条件下での実験が行われるようになったこと（燃焼実験など）、②小型加速器を用いての実験も進められていること（理研小型中性子源RANSは産業応用がメイン）、③パルス中性子イメージング法が実用化してきたこと（結晶組織構造、磁場分布測定）が挙げられた。

京都大学原子炉でのコンクリートの爆裂現象の観測では、コンクリートを加熱して爆裂が起きた時の水分挙動が加熱面からの距離の関数として明らかにされた。

RANSを用いて行われた鋼材塗膜下腐食の直接観察では、小型加速器でもイメージングができることを示した。

次にパルス中性子透過測定の話に移り、まずその原理が述べられた。図2に示すように、入射中性子と透過中性子の時間を関数とした比から、結晶面間隔、結晶構造、結晶粒サイズ、結晶の配向性等が分かる。これらの性質を利用して、焼入れした鉄鋼のマルテンサイト相の測定に成功している。

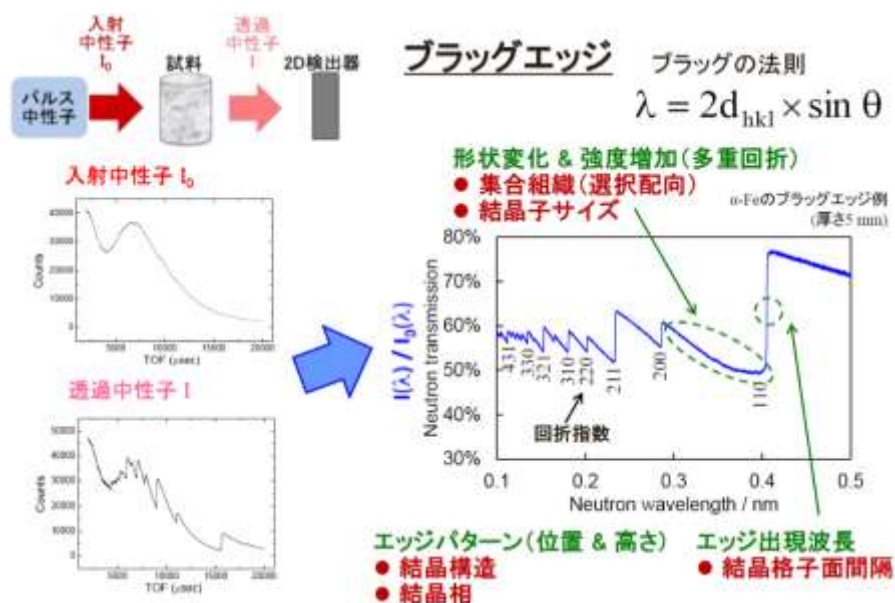


図2 パルス中性子透過測定の原理

非破壊での検査が必須である美術工芸品の測定例として、日本刀の分析が取り上げられた。図3に示すように結晶配向・結晶粒サイズから刀の製法が、焼入れ部の硬さなどから刀の強度が、全体の情報として刀の良し悪しを判断することが可能である。

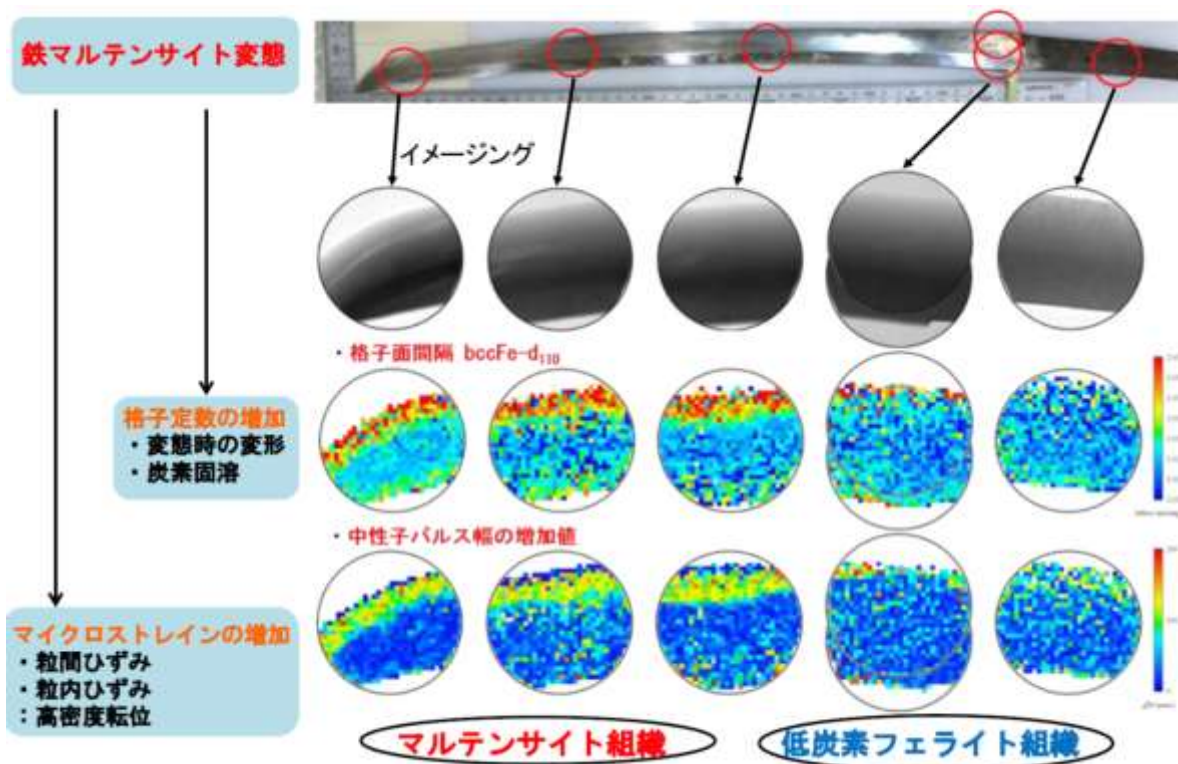


図3 日本刀のRADENによる測定結果

最後に磁性材料・磁気利用製品の改良を目的とした磁場イメージング、中性子により引き起こされる通信システムのソフトウェアの回復システムの作動試験が紹介された。

講師はJCANS (ジェイキャンズ、Japan Collaboration on Accelerator driven Neutron Sources) の代表を務めている。これは、日本における加速器駆動中性子源の研究を基礎として、中性子ビームの実用技術及び産業応用までを含めたコンソーシアム形成を指向する、総合的なネットワークである。中性子を使いたい方の相談に乗るとのこと。ホームページは以下のとおりである。

(<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp/JCANS/index-j.html>)

質疑応答では、日常使われる橋やトンネルの非破壊検査のためには可動式中性子源が必要であるが、その実現可能性についての質問があった。講師からは最初に「夢である」との言葉が寄せられた。基本的な装置は理研でほぼ完成しているが、遮蔽が大変であることや法的な問題等が述べられた。イメージングの時間については数秒程度でも良いが、エネルギー分析には数時間必要であるとのこと。日本刀が優れているのは鍛造技術のみならず、原材料の玉鋼が良いことも1つの理由であるとの意見が会場からなされた。

講師は1973年に完成した北海道大学の45MeVの電子線形加速器に付属する小型中性子源(HUNS)に当初から関与し、冷中性子源、準弾性散乱装置、磁気集束デバイス、TOF検出器、パルス中性子イメージング装置等の開発の中心となった。今回講演されたように、定年後名古屋大学に移ってからは、中性子源の開発だけではなく、その応用にも力を入れている。日本刀のマルテンサイト変態に対する説明は金属の専門家にも勝るもので、講師の研究意欲がますます盛んであるという印象を受けた。

(義家敏正 記)