

を交えて有益な交流会を滞りなく終了することができました。



交流会のスナップ。

第 62 回放射線科学研究会 聴講記

標記研究会は平成 29 年 4 月 14 日（金）午後 1 時半から 5 時半まで住友クラブにおいて、羽鳥聡氏（若狭湾エネルギー研究センター）、齊藤泰司氏（京都大学原子炉実験所）、高井大策氏（環境科学技術研究所）、宮坂靖彦氏（元日本原子力研究所）の 4 名の講師をお招きして開催した。座長は前半 2 件を、岩瀬彰宏氏（大阪府立大学）後半 2 件を見玉靖司氏（大阪府立大学）にお願いした。なお、講演会終了後、講師の先生を囲んで技術交流会を行った。

1. 若狭湾エネルギー研究センター加速器施設の現状

（公財）若狭湾エネルギー研究センター 羽鳥 聡

若狭湾エネルギー研究センター（以下、若狭湾エネ研）は、エネルギー関連技術や地域産業への応用技術の研究、研修などを目的として、1994 年に設立された研究施設である。若狭湾エネ研の大きな特徴は、複数の大型イオン加速器施設を有することである。それは 5MeV タンデム加速器、200MeV 陽子シンクロトロン加速器、200keV マイクロ波イオン源イオン注入装置からなる。本講演では、シンクロトロン加速器への入射器として使われるとともに、イオンビーム分析などにも活用されている 5MeV タンデム加速器と、がん治療臨床研究などに使われてきたシンクロトロン加速器について、その概要とそれを用いた研究について紹介していただいた。

ス」がある。後者ではビームの大気取り出しができて、歯科試料や植物試料の分析も可能ということである。

一方、照射室2には3本のビームラインがあり、幅広い温度域(100-1000K)でビーム照射が可能な「イオン注入コース」、マイクロビームが使える「生物照射コース」、ウィーンフィルターとTOF質量分析を備えた「イオン分析コース」がある。「イオン注入コース」では、原子力用、宇宙用の半導体デバイスの耐放射線試験やイオン注入実験が行われている。「イオン分析コース」では、反跳弾性粒子検出(ERDA)と飛行時間測定(TOF)を組み合わせた軽元素分析技術の開発が行われていて(図3参照)、深さ方向の位置分解能が1.3nmに達するまでに至っている。

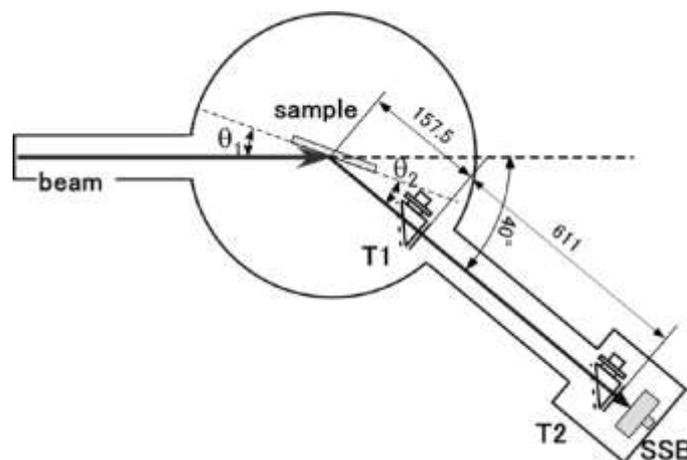


図3 TOF-ERDA法で用いられる検出器や測定試料の配置。

続いて、シンクロトロンの概要とそれを用いた研究についての説明があった。本加速器により、陽子は200MeVまで、重イオンは核子あたり55MeVまで加速され、照射室3、4(図2参照)において医療や生物材料照射に供されてきた。照射室3には水平、垂直2門のビームランと患者位置決め用X線CTが設置されており(図4参照)、2002年から2009年まで前立腺55例、肝臓6例、肺1例のがん臨床治療が行われた。このような若狭湾エネ研におけるがん臨床成果は、2011年に運転を開始した福井県立病院陽子線がん治療センターへと受け継がれた。現在、若狭湾エネ研のシンクロトロンは、主に動物照射による医療照射基礎研究として使用されている。

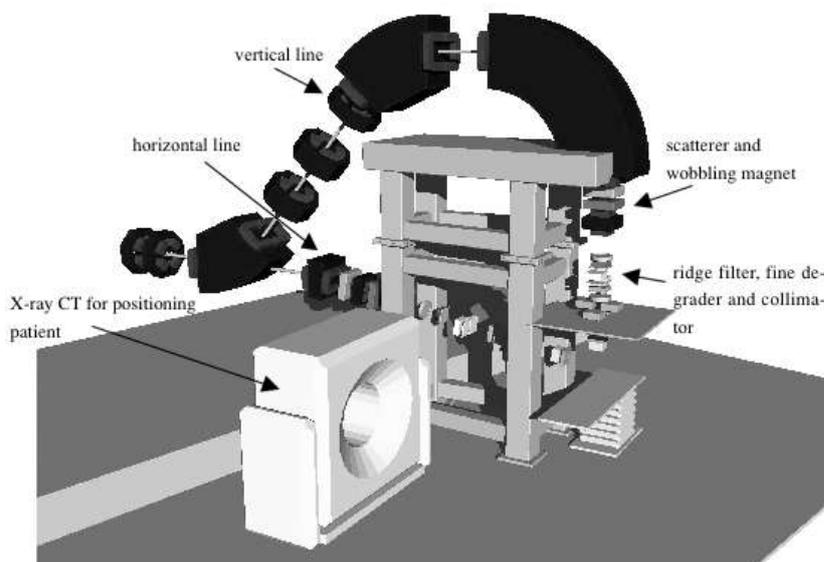


図4 照射室3がん治療コース。

照射室4の「生物照射コース」では、イオンビームによる突然変異を利用して、新しい品種の育種研究が行われている。現在までに登録された植物品種は7種であり、微生物や動物性培養生物への照射研究も進行している。さらに、シンクロトロンから発生可能な50-200MeVの陽子線は太陽由来宇宙線(荷電粒子)のエネルギーと類似であることを利用して、近年では人工衛星に搭載される電子機器の耐放射線特性の評価にも活用されているとのことである。

講演では特に触れられなかったが、若狭湾エネ研では、タンデム加速器、シンクロトロン加速器の他に、マイクロ波イオン源イオン注入装置も有している。この加速器では、50 keV程度の水素や希ガスの大量注入を正確なエネルギーで行うことができ、筆者もおおいに利用させてもらっている。このように広範囲なエネルギーとイオン種を網羅する加速器群を有した施設は西日本唯一のものであり、今後も材料、医療、生物など多岐の分野での活用が期待される。

(岩瀬彰宏記)

2. 中性子とX線を用いた熱流動現象の可視化計測

京都大学原子炉実験所 齊藤泰司

3. 11の東日本大震災と福島原発事故以来、日本では、研究炉を含む大部分の原子炉が停止した状態が続いている。本講演では、研究炉からの中性子を用いた研究は依然として重要だということを示す意味でも、中性子の特徴を大いに生かした「流れの可視化」研究について紹介いただいた。

可視光による観察ができない状況において「流れ」を観測するには、超音波や放射線を用いることが有効である。講師は長年、主に京都大学研究用原子炉(KUR)を用いた流れの中性子イメージングの研究を行ってこられた。講演では、まず中性子イメージングの特徴として、金属でも透過性が大きい Fe、逆に大きな中性子吸収断面積を持つ Cd などの元素があるので、容易に透過像が得られ、直感的に理解しやすいことが挙げられた。次に中性子イメージングの撮像システムについての解説があった後(図2参照)、茨城県東海村の原子力機構にある JRR-3M を用いた液体金属の流れの可視化に関する中性子イメージングの応用例が示された。用いた液体金属は、融点の低い PbBi(鉛ビスマス)合金である。流れのトレーサとして吸収断面積の大きい Cd を用いるが、PbBi と質量が同じくなるように Au との合金 AuCd₃ を用いた。液体金属の流れの様子をとらえた動画を見せていただいたが、金属容器に囲まれた液体であり、目ではもちろん、X線でも見ることで見えない流れの様子が可視化されていることに驚いた。

以上の JRR-3M を使った応用例は、2次元の流れの可視化であったが、次に、韓国の HANARO による流れの 3次元可視化の試みに関する説明があった。流れを3次元的に捉えようとするには、複数の中性子源を用いれば可能であるが、それは現実的ではない。そこで講師らは、奥行き方向の距離に対する画像のボケ具合を定量化し、それによって奥行き方向の流れを捉えることにより、流れの3次元計測に成功した。実際の流体の流れにおいては、それを3次元的にとらえることが重要であるが、この研究結果は、複数でなく1つの中性子源と特殊な撮像システムを組み合わせることによって3次元計測を可能にしたものである。

次に、KUR を用いた中性子イメージングについて、装置の詳細とともに実験結果の説明があった。図3は KUR の照射ポートを示しており、図中の E2 ポートが従来の中性子ラジオグラフィ設備である。また



図1 講演中の齊藤講師。

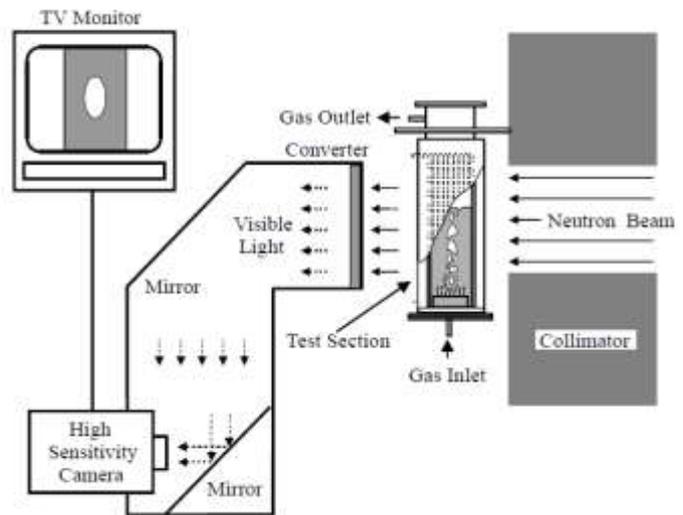


図2 中性子イメージングの概要。

B4 ポートは中性子導管で炉室外の実験室に中性子ビームを取り出すことができる。図3には、B4 中性子導管実験室の模式図を示す。KURにおいて整備された沸騰二相流中性子ラジオグラフィの設備は世界唯一のものであり、いろいろな研究が精力的に行われている。講演ではそのうちのいくつかが紹介された。図4は、燃料電池内の水分分布を可視化した例であり、金属で覆われた燃料電池内部の微細な流路中での水の分布が詳細にとらえられている。他にも

いろいろな企業や大学との共同研究で、超臨界水熱法によるナノ粒子合成プロセスにおける超臨界水の流れの評価、高強度コンクリートが爆裂に至るまでのコンクリート内部の水分移動の様子をとらえる実験など、KURの設備でしか実施することのできない実験が多く遂行されている。

講演の最後には、中性子イメージングと相補的な手法である X 線イメージングによる流れの可視化についても触れられたが、本講演により、高線量の中性子ビームは材料評価にとって必須なものであることが改めて認識された。国内の研究炉が一刻も早く再稼働されることを期待したい。

また、本研究会では、原子炉（JRR-3M）を立ち上げた元原研の宮坂氏も講師として参加しており、施設を立ち上げた技術者と、それを利用して成果を挙げた研究者との、世代を超えての交流も実現できたことを合わせて報告しておきたい。

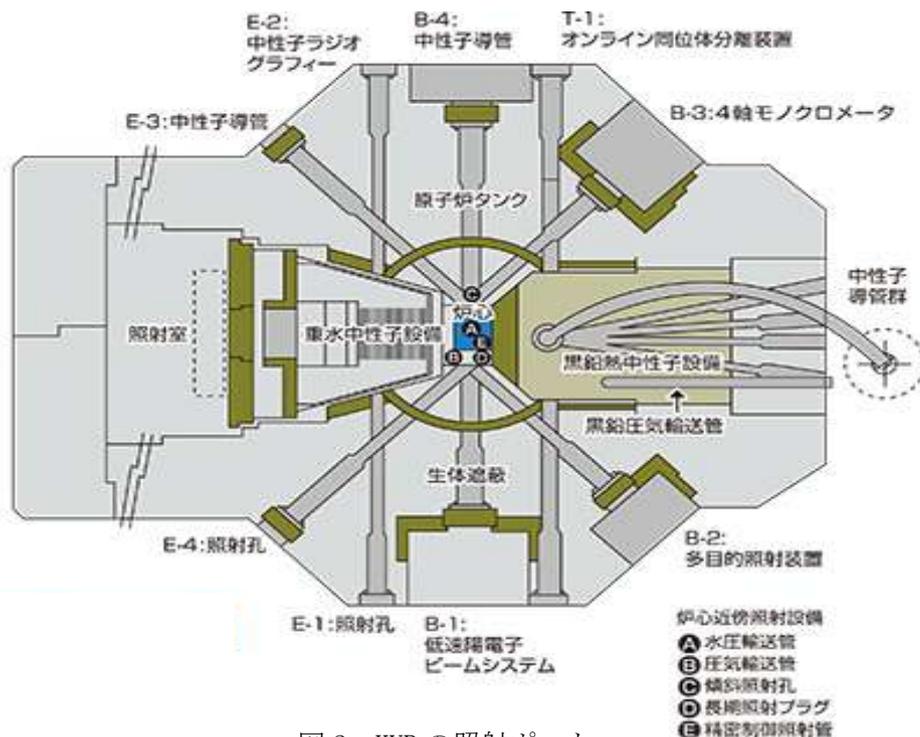


図2 KURの照射ポート。

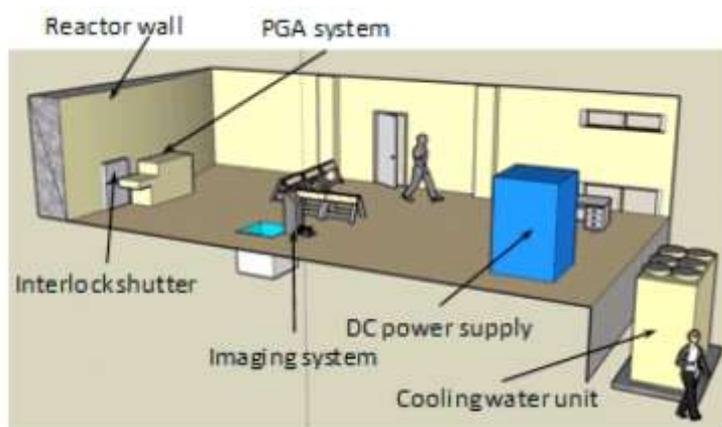


図3 中性子導管実験室の概要。

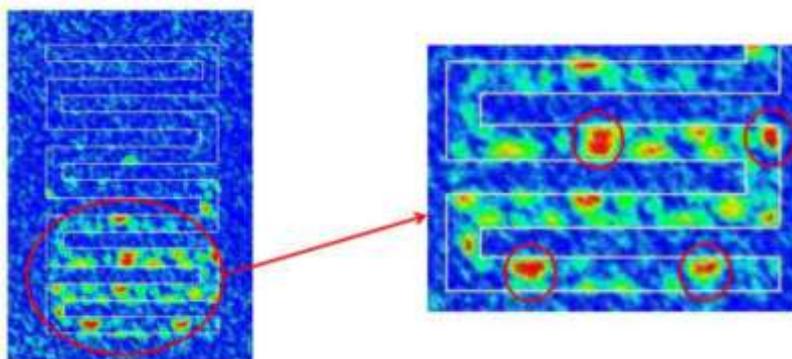


図4 燃料電池内部の水分分布の測定結果。

(岩瀬彰宏記)

3. 抗腫瘍免疫の低線量率放射線照射による抑制を飼育環境変化で緩和する試み

(公財) 環境科学技術研究所 高井大策

放射線による生物影響が線量率によって異なることは、線量率効果としてよく知られている。一般に、線量率が低下すると生物効果は小さくなる。ヒトに対する放射線の低線量率被ばくの影響を予測するためには、マウスを用いた動物実験が欠かせないが、照射実験施設の制限のために実験データは限られている。そのような状況において、公益財団法人環境科学技術研究所では、世界的にも類のない規模の低線量率放射線の長期連続照射が可能な動物実験施設を利用して、これまでにマウスを用いた低線量率放射線の貴重な影響研究を行ってきた。これまでに、1日に0.05mGyで400日(総線量20mGy)ガンマ線を照射されたマウスでは寿命や発がん率に影響がみられないこと、一方で、1日に20mGyで400日(総線量8,000mGy)ガンマ線を照射された雄マウス、並びに1日に1mGy及び20mGyで400日(それぞれ総線量400及び8,000Gy)ガンマ線を照射された雌マウスでは、有意な寿命短縮が観察されることを明らかにしている。

さてこの度の高井講師の講演では、まず、マウスにおける移植腫瘍の排除機構に対する低線量率放射線の影響について紹介があった。一日当たり20mGyのガンマ線を400日連続照射したマウスでは、非照射マウスと比べて有意に移植腫瘍の生着率が上昇することがわかった。この結果は、低線量率(20mGy/day)照射によって、マウスの移植腫瘍排除能が低下することを示している。そこで、マウスの免疫機能を活性化することによって、この腫瘍排除能低下を抑制することを試みた。そのためにこの度高井講師らが採用した試みが環境エンリッチメントである。環境エンリッチメントとは、動物の飼育環境について野生に近い状態を再現し、動物本来の能力を



図1 講演中の高井講師。

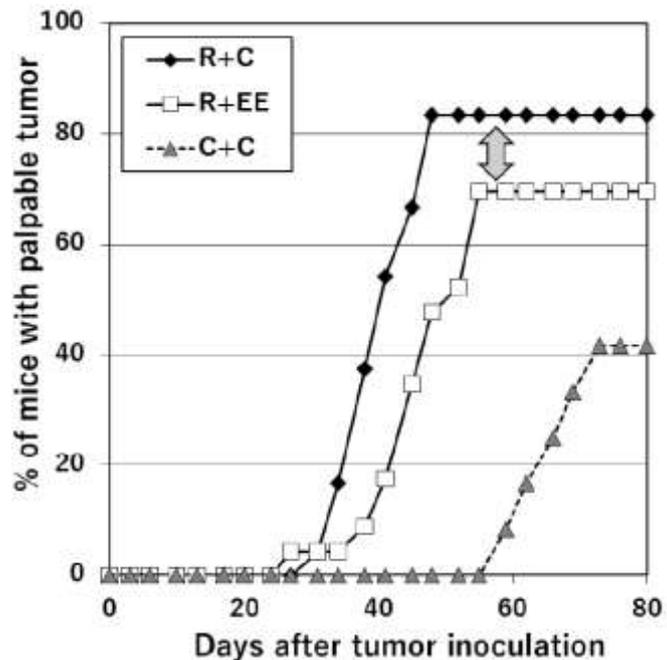


図2 移植腫瘍の生着率。R+C(照射マウスを通常飼育した群)、R+EE(照射マウスを環境エンリッチメント飼育した群)、C+C(非照射マウスを通常飼育した群)。各群のマウスに同数の腫瘍細胞を背部皮下移植し、腫瘍形成を観察した。横軸が経過日数、縦軸が移植腫瘍の生着が確認されたマウスの割合を示す。

発揮させるための飼育環境を指す。今回紹介する実験では、環境エンリッチメントとして、通常の飼育ケージにエンリッチメントデバイスとして、Igloo with running wheel を設置した。これにより、回転する皿の上でマウスが自由に運動できる環境になった。予備試験として、非照射マウスに環境エンリッチメントを施し、腫瘍細胞を移植したところ、ほとんど生着しないことがわかった。すなわち、環境エンリッチメントによって、マウスの免疫機能が活性化され、移植腫瘍排除能が上昇したことを示している。そこで、あらかじめ8週間にわたり環境エンリッチメント下で飼育したマウスに3Gyのガンマ線を照射し、その後腫瘍を移植してその生着率について調べたところ、環境エンリッチメントにより有意に腫瘍の生着率が低下する効果がみられた(図2)。このことは、放射線被ばくによるがん細胞が生育しやすい体内環境の形成、を環境エンリッチメントにより緩和することが可能であることを示している。今回の結果は、高線量率放射線による抗腫瘍免疫活性の低下を飼育環境の改善で緩和するというものであったが、今後、低線量率放射線による抗腫瘍免疫活性の低下についても、同様の効果が得られるのかどうかに関する研究成果が期待される。更にヒトにおける生活環境の改善が、果たして抗腫瘍効果を活性化させる作用があるのかどうか、今後の興味深い課題といえるだろう。

(児玉靖司記)

4. 研究用原子炉の歴史を顧みて

元日本原子力研究所 宮坂 靖彦

日本の原子力研究は、アメリカ合衆国のドワイト・D・アイゼンハワー大統領が、1953年12月8日にニューヨークの国際連合総会で行った演説で提唱した平和のための原子力 (Atoms for Peace) を受けて、1954年3月に中曽根康弘氏、松前重義氏らの提案で「原子力構築のための基礎研究及び調査費」2億3,500万円 (U-235 にちなんだ金額) が国会で可決されたのが始まりである。この予算を基に、原子力利用準備調査会が設けられ、海外調査が行われた。

その後、日本原子力研究所が1955年1月に設立され、日本の原子力開発が本格化した。講演では、東海にある研究用原子炉 Japan Research Reactor-1 (JRR-1)、JRR-2、JRR-3、JRR-3M、JRR-4、Nuclear Safety Research Reactor (NSRR)、及び大洗にある Japan Materials Testing Reactor (JMTR) について話された。表1、表2に各炉の特徴を示す。

JRR-1は国内での最初の臨界を実現した原子炉である。原子炉の教育・訓練に大きな役割を果たした。図2は完成式の写真で、総参加者は1万数千人であったそうである。

JRR-2は重水減速・重水冷却型原子炉で、基礎研究用に用いられた。初期段階から多くの問題点が発覚したが、その経験がその後の原子力研究所の原子炉設計や保守管理に役立った。ホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) の先駆的研究も行われている。



図1 講演中の宮坂講師

JRR-3 は別名「国産1号炉」と呼ばれる原子炉で、多くの産業界の技術者の原子力技術の基礎固めに寄与した。1990年に臨界に達したJRR-3Mは、JRR-3の建屋を利用しただけの全く新しい炉であり、その後世界で建設された研究炉のモデルとなった。

JRR-4は原子力船の建設の遮蔽実験のために建設された。不幸にも原子力船陸奥の事故のために日本の商業用の原子力船建設は頓挫したが、JRR-4自体は照射実験やSiへのPドーピング、BNCT等に東日本大震災前まで有効に利用された。特に京大原子炉が、燃料低濃縮化の準備のために休止していた期間中は、国内で唯一のBNCTが可能な原子炉であったことは良く知られている。



図2 1957年9月18日のJRR-1完成式。

表1 JRR-1、JRR-2、JRR-3の特徴比較。

施設名称	JRR-1	JRR-2	JRR-3	
定格熱出力	50kW	10MW	(国産1号炉) 10MW	(JRR-3M) 20MW
最大熱中性子束	1.2×10^{12} n/cm ² s	1.3×10^{14} n/cm ² s	3×10^{13} n/cm ² s	3×10^{14} n/cm ² s
燃料	20%濃縮ウラン硫酸ウラン水溶液	90%/45%濃縮ウラン板状燃料	天然ウラン金属燃料/ UO ₂ 棒状燃料 (天然・1.5%濃縮)	20%濃縮ウラン板状燃料
用途	・基礎研究 ・教育訓練	・中性子ビーム実験 ・水平実験孔での燃料照射ループ ・燃料・材料照射 ・RI生産 ・シリコンドーピング ・放射化分析 ・医療照射	・燃料・材料照射 ・医療照射 ・RI生産	・中性子ビーム実験 ・燃料・材料照射 ・RI生産 ・放射化分析 ・シリコンドーピング
運転	8/1957~ 3/1969 11年間	10/1960~12/1996 36年間	1962年/1983 21年間	1990年~
現在	記念展示	冷却施設等撤去済み(2004年) 炉体のみ保管中	解体撤去 (炉体:保管庫に安全貯蔵中)	運転再開準備中

表2 JRR-4、NSRR、JMTR の特徴比較。

施設名称	JRR-4	NSRR	JMTR
定格熱出力	3.5MW	最大出力:23,000 (0.004秒間) 定常:300kW	50MW
最大熱中性子束	7×10^{13} n/cm ² s	—	炉心平均: 3×10^{14} n/cm ² s
燃料	90%/20%濃縮ウラン 板状燃料	U-ZrH	90%/20%濃縮ウラン 板状燃料
用途	<ul style="list-style-type: none"> ・遮蔽実験 ・放射化分析 ・RI生産 ・医療照射 ・教育訓練 ・シリコンドーピング 	原子炉燃料の安全性 研究 ・反応度事故 ・冷却材喪失事故 (燃料棒形状喪失開始 条件、熔融進展挙動 の評価)	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料・材料照射試験 ・放射化分析 ・RI生産
運転	1965年～ 2011	1975年～	1968年～2006年 2007年改修開始
現在	2013年9月閉鎖決定 廃炉申請準備中	運転再開準備中	2016年秋閉鎖決定 廃炉計画準備中

NSRR は、TRIGA 炉で原子炉燃料の反応度事故を模擬した実験に用いられてきた。特に今回の東電福島 3.11 事故で、炉内で起きた現象を解明するためのシミュレーションに期待が寄せられているので、再開する予定であるとのこと。

JMTR は材料・燃料の照射試験と RI 生産を目的とした材料試験炉である。多くの材料の照射効果の実験に寄与したが、2007 年から老朽化施設の更新工事が始まり、2011 年に終了した。しかし、東電福島 3.11 事故後に制定された新規制に適合させるには莫大な費用が掛かることから、2017 年 2 月に廃炉が決定した。更新後には材料試験のみならず、Mo-99 の製造等に期待が寄せられていただけに、残念なことである。

講師は 1960 年に日本原子力研究所に入所以来、研究用原子炉の運転や設計に従事してきた技術者である。それだけに現場の人しか分からない話を聞くことができた。また参加者の中には日本原子力研究開発機構の原子炉のユーザの方も多く、有意義な情報の交換もできた。

講師は第一世代の技術者である。初期の日本原子力研究所時代の研究炉で起きた、多くのトラブルを経験し克服することにより、技術力を高めてきた世代である。東電福島 3.11 事故の後、殆どの研究炉が運転停止になり、その中のかなりのものが廃炉となる予定である。そして研究炉の運転が無い中で、現場の技術者は次々と引退している。講師等が培った技術の継承が懸念される。

(義家敏正記)