

# JAEA NEWS 24

JAEA ニュース 第24号 2008年8月



敦賀本部 保守研修施設を視察するタイ王国原子力庁広報セクション Ketvarong NUKULKIJさん（文部科学省原子力研究交流制度にて来日）

## CONTENTS

---

### R&D研究最前線

難治性がんが存在する「がん遺伝子Bcl-2」に重粒子線治療が効果的なことを解明

### Challenger

加速電圧検出用無誘導型分圧抵抗器の開発

### CLOSE UP

第6回敦賀国際エネルギーフォーラム開催  
男女共同参画推進への取り組み

### TOPICS

山東 昭子参議院副議長が東海地区を視察

タイ王国の研修生が原子力機構で原子力広報の研究活動に取り組む

青少年のための科学の祭典2008全国大会に出展

半導体スピントロニクス材料実用化へのブレークスルー —動作温度上昇への鍵を放射光が解明—

原子力研修センター講座のご案内

もんじゅコーナー

原子力機構よりお知らせ

# R & D 難治性がん中存在する「がん遺伝子Bcl-2」に重粒子線治療が効果的なことを解明

放射線療法は、がん治療における有効な選択肢のひとつとなっています。その中でも、近年、注目を集めている重粒子線治療は、ガンマ線やX線を用いた通常の放射線療法が効きにくいがんに対しても良好な治療成績をおさめています。さらにがん遺伝子Bcl-2が高発現しているタイプのがん細胞にも重粒子線が有効なことが、今回の培養細胞を用いた実験で証明されました。放射線抵抗性のがんに対する重粒子線治療の有効性に医学界から大きな期待が寄せられています。



量子ビーム応用研究部門 / マイクロビーム細胞照射研究グループ 協力研究員 浜田 信行  
量子ビーム応用研究部門 / マイクロビーム細胞照射研究グループ リーダー 小林 泰彦

## がん治療の最前線で注目されている重粒子線について教えてください。

▲ 昨今、放射線は診断から治療までの幅広い医学分野で活用され、特に、切らずに治せ、痛みや副作用が少ないため体に大きな負担がかからない治療法として欠かせません。使用する放射線種もX線、ガンマ線、陽子線、中性子線などがあり種類によって体への影響の与え方が異なります。例えば診断や治療で一般的によく使用されているX線の場合、当たった皮膚表面付近で最も線量が大きく、患部に届くまでに深さとともに線量が弱まります。そのため皮膚やがんの手前にある臓器が耐えられるギリギリの量に抑える必要がありました。最近ではIMRT（強度変調放射線治療）でいろいろな方向から多角的に当てて皮膚や周囲の組織に対する副作用を分散させる方法が効果を上げています。そこで、近年注目されているのが重粒子線です。重粒子線とはヘリウム原子より重い粒子線（イオンビーム）の総称です。重粒子線は、ある深さでピタッと止まってその先には行かず、しかも粒子がストップする寸前に最も強いエネルギーを与えるという性質を持っています。このため、がんのところでちょうど停止するように重粒子線を照射することによって、皮膚表面組織の損傷は少なく、体の奥にあるがん病巣だけに確実に線量を集中させることができます。

## 「がん遺伝子Bcl-2」を持つタイプのがんは治療が難しいと聞きますがなぜですか？

▲ X線やガンマ線などの放射線治療で効果の現れにくい「放射線抵抗性」のがんには、いくつかのタイプがあります。

1つは腫瘍の塊が大きくなり、内部が低酸素状態になっているもの。酸素効果といって、低酸素環境では、酸素が多い場合と比較して放射線による細胞致死効果が低下します。したがって、低酸素状態にあるがん細胞はX線やガンマ線には抵抗性を示します。また「がん抑制遺伝子p53」が正常に働いていないためにアポトーシス（細胞の自殺）や細胞分裂停止を起こす機能が阻害されている細胞や、「がん遺伝子Bcl-2」の働きでアポトーシスが抑制されている細胞も、X線やガンマ線には抵抗性を示します。このがん遺伝子Bcl-2が働いているがん細胞は、乳がんの約80%、大腸がんの約50%、メラノーマ（悪性黒色腫）の約60%、肺がんの約30%、すい臓がんの約25%などで見出されており、大まかに言えば、がん患者の半数以上がこのタイプです。放射線による細胞死にはアポトーシスが深く関係しているため、このタイプのがん細胞はX線やガンマ線では死に難しくなっていると考えられます。

## 重粒子線が「がん遺伝子Bcl-2」に効果的だと解明された根拠について教えてください。

▲ 重粒子線では酸素効果がなく、低酸素状態あるいは無酸素状態であっても正常な酸素状態と同様の致死作用を示しま

す。また、重粒子線では、がん抑制遺伝子p53の働きの有無によらず、同じように細胞が致死することが分かっています。しかし、がん遺伝子Bcl-2の働きでアポトーシスが抑制されている細胞に対して、重粒子線が有効かどうかは、まだ分かっていませんでした。

今回の研究ではがん遺伝子Bcl-2を組み込んだヒト子宮頸がん由来のHeLa細胞を培養し、ヘリウム、炭素、ネオン、アルゴンなどの重イオンビームを照射して細胞致死効果を比較しました。すると、炭素以上の重イオンビーム照射では、がん遺伝子Bcl-2の過剰発現の有無による違いは見られず、さらに、その致死効果は、ガンマ線に比べて3.5倍から5.2倍も高いことが分かりました（図1）。すなわち、Bcl-2が高発現しているタイプのがん細胞に対して重粒子線が有効であることが明らかになりました。

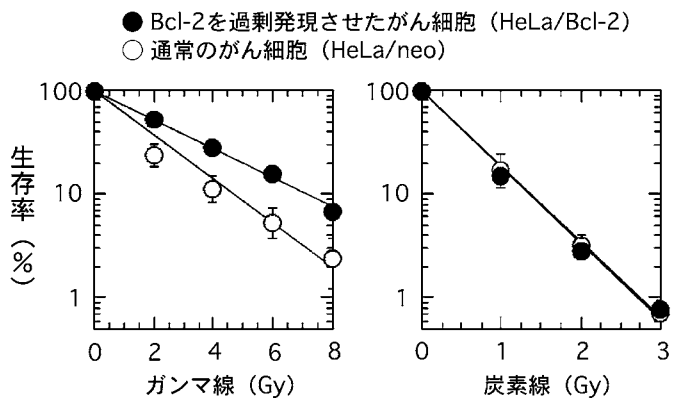


図1 培養がん細胞へのCo-60ガンマ線と炭素線照射効果

## 次の課題はどんなものですか？

▲ これまで群馬大学と協力し、高崎量子応用研究所のイオン照射研究施設(TIARA)を用いて研究を進めてきました。その結果、重イオンビームは、がん遺伝子Bcl-2を過剰に発現させた培養細胞の放射線抵抗性に打ち克つことを発見しました。すなわち、従来のX線、ガンマ線、陽子線などによる放射線治療が困難なタイプのがんでも、重粒子線なら有効である可能性が世界で初めて示されたこととなります。

ただし、今回の実験結果を解析すると、Bcl-2の作用に逆らってアポトーシスがある程度誘発されたことに加え、何か複合的な原因がありそうです。今後は、そのメカニズムを調べ、証明していくとともに、放射線と薬剤の併用などによってさらに治療効果を向上させることが課題となります。このように放射線の有効利用には、医学の分野でも大きな期待が寄せられています。

## 加速電圧検出用無誘導型分圧抵抗器の開発

加速器の運転維持管理業務に携わって早や16年。イオン照射研究施設(TIARA)のシングルエンド加速器で最大加速電圧3MVを可能にするため、いかに電圧を上げ、安定維持させるかにチャレンジしてきたという宇野さん。試行錯誤しながら、抵抗器に起こる損傷に原因の一端を発見し、故障しにくい無誘導型分圧抵抗器の開発に成功。これにより最大定格における安定な加速器運転が実現されました。



高崎量子応用研究所  
放射線高度利用施設部  
イオン加速器管理課

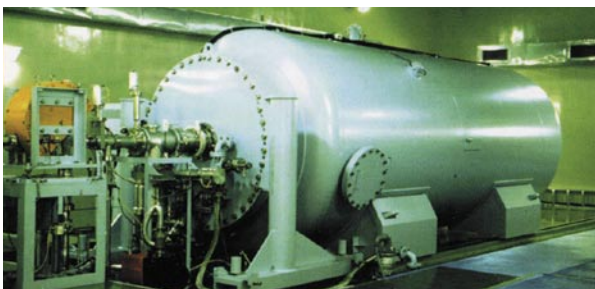
宇野 定 則

### 入社きっかけと担当業務について教えてください。

地元の工業高校出身ということで、既に多くの先輩方が働いていたこともあり、私も自然と入社していました。当時、群馬県ではあまり知名度がなかったため、原研(当時)がどのような研究をしているかまでは詳しく分かりませんでした。

高崎研究所は当時、1号電子加速器が更新されて1年経った頃で、トラブルなどを処理しながら加速器の構造について学んでいきました。電子線照射施設に初めて触れ、先輩から「テレビのブラウン管と同じ仕組みだよ」と説明を受けたことも懐かしい思い出です。

その後、茨城県の東海研究所(現:原子力科学研究所)の業務に携わった後、高崎研究所に戻ってから、TIARAのイオンビーム分析に用いられるシングルエンド加速器と材料開発に用いられるイオン注入装置の立ち上げから関わってきました。現在は、このシングルエンド加速器の運転維持管理やそれに伴う照射技術の開発を進めています。



3MVシングルエンド加速器

### 加速電圧検出用無誘導型分圧抵抗器の開発について教えてください。

シングルエンド加速器は設置当初から、最大定格電圧の3MVまで上げられないという課題がありました。2.8MV以上に上げると、内部に生じる放電によって加速電圧検出用抵抗器が劣化し、実験に支障をきたすことが分かっていたのです。そのため最大でも2.6MVに制限して利用していました。

抵抗器は電流を一定に保てるように調整したり、電圧を分けるほか、電圧を検出する役割があります。抵抗器が劣化すると加速電圧を正確に検出できなくなるため、精密性を保持するためにも早急な解決が望まれました。

そこで我々は抵抗器メーカーと協力し合い、放電による損傷を起こさない抵抗器の開発に力を注ぎました。

劣化した抵抗器の性状を精査すると、実験に使った抵抗器の端にスパークした跡が見られました。このことから放電による損傷が、抵抗器表面の端部に集中していることが分かりました。損傷を抑えるためにまず抵抗器に金属の保護管をつけてみました。それによって、多少の改善は見られましたが、まだまだ完璧ではありませんでした。抵抗値

を常に一定に保つ必要があることや、損傷は0(ゼロ)に等しくなければ意味がないので、この方法は断念しました。

次に、無誘導形状を試してみることにしました。加速器の内部では、数種類の抵抗器が使われていて、その中には劣化が起こりにくいものがあり、調べてみると無誘導形状であることがわかりました。また、以前携わっていた核融合の加熱装置での経験も今回の抵抗器開発に役立ちました。電気が流れると磁界が発生して電位が生じます。そこに誘導成分があると抵抗内部に電位勾配ができてしまい、放電の損傷が端部に集中します。そこで放電耐性を向上させるため、高耐久を目的とした無誘導形状の抵抗器を考案しました。従来の円筒形に螺旋状のトリミングが入ったものを板状に変えて、電気経路を蛇腹にしてみました。これは右ネジの法則に従って磁場同士がぶつかることでキャンセルされ、無誘導となるものです。

試作とテストを重ね、やっと損傷を極限まで抑えられる抵抗器が完成しました。さらに加えて、加速器内部の放電対策を重ねたことで、最大定格電圧の3MVで安定的に運転できるようになり、大気マイクロPIXE(粒子線誘起X線)分析も安定にかつ短時間に行うことが可能となりました。万全を期してこの抵抗器は約2年で交換するという予防策も講じました。



従来の抵抗器(上)と開発された新型の抵抗器(下)  
円筒型を平型にして電気経路を蛇腹に通した。

### 今後の課題を教えてください。

シングルエンド加速器はイオンビーム分析に用いられることが多く、特にマイクロビームにPIXEを導入した大気 $\mu$ PIXE分析は生きた細胞の成分の分析などに適しています。そのため医学分野での活用が多く、他の大学などと連携して、がん細胞などの成分分析の研究が進められています。

さらに、プロトンビームライティング(PBW)という、マイクロビームで微細加工を行う技術開発が進んでいます。このため、イオン源の輝度の向上が課題です。今後も様々な分野で利用されるように、加速器の性能の向上を図っていきたいと思います。

## 第6回敦賀国際 エネルギーフォーラム開催

6月6日、7日、福井県敦賀市の若狭湾エネルギー研究センターにおいて「エネルギーと環境／もんじゅからの提案」をテーマとして第6回敦賀国際エネルギーフォーラムを開催し、延べ938名（内、海外からの参加者43人、学生232人）の方に参加いただきました。フォーラム冒頭では、旭 信昭福井県副知事、河瀬 一治敦賀市長および古谷 毅文部科学省審議官からご挨拶をいただきました。

### 特別講演

経済産業省資源・エネルギー庁電力・ガス事業部の西山 英彦部長から気候変動に対応する日本のエネルギー政策について講演いただきました。気候変動を抑制するため、我が国でも広範な対策がとられていますが、中でも、原子力発電は、地球温暖化対策として有効であるのみならず、経済成長との両立を可能とする重要なエネルギー源であることが強調されました。

### 基調講演Ⅰ・セッションⅠ

基調講演Ⅰでは、東京大学の田中 知教授から、原子力エネルギーの影の部分について、その解決のための取り組みも含めて積極的に伝えて国民の理解を深めるなど、原子力エネルギーを正當に評価することの必要性が指摘されました。

セッションⅠでは、世界各国のエネルギー・環境政策について、米国、フランス、中国、インド、ロシアおよび日本から報告いただきました。いずれの国においてもエネルギー安定供給、環境保全対策の両面で、原子力が今後ますます重要になることが確認されました。また、原子力分野での国際協力の必要性が報告されました。

### 基調講演Ⅱ・セッションⅡ

基調講演Ⅱとして原子力機構の伊藤 和元理事から「もんじゅ」の状況について紹介し、今年の秋10月頃の運転再開を目指して着実に作業を進めていることを報告しました。

セッションⅡでは、限られた資源の問題を解決するためには、高速増殖炉開発が喫緊の課題であることが改め

て確認され、その中で、OECD/NEA、米国、フランス、中国、韓国の専門家から、「もんじゅ」を今後の高速炉開発の様々な分野で有効に活用していきたいとの要望が表明されました。

### 基調講演Ⅲ・紙芝居・セッションⅢ

基調講演Ⅲでは、松田 美夜子原子力委員から、エネルギーの安定供給を図りつつ、地球温暖化を抑制するためには原子力の平和利用の拡大が不可欠であることや、放射性廃棄物処分の問題について取り組まれているワークショップ「共に語ろう電気のごみ」等の事例をご報告いただきました。

その後、敦賀市女性エネの会から「地球温暖化って？」と題する紙芝居で問題提起をいただき、セッションⅢとして開催した「原子力熱中塾」では、エネルギー、環境、放射線、エネルギー拠点化計画、廃止措置等のテーマについてグループに分かれ、活発な意見交換が行われました。

### セッションⅣ

セッションⅣでは、次代を担う子供たちに、どのようにエネルギー、環境に関する教育を行っていくべきかについて、米国、韓国、スウェーデンおよび福井県の教育関係者が熱心に意見を交換しました。

### ポスターセッション

各方面協力を得て行われた電気自動車の展示を始めとするポスターセッションにも参加者から多くの関心が集まりました。



岡崎 俊雄理事長による挨拶



国際原子力拠点としての「もんじゅ」の役割をテーマとしたパネル討論

## 男女共同参画推進への取り組み

平成 20 年 3 月、原子力機構における男女共同参画の実現を現在の重要な経営課題として捉え、積極的かつ計画的に男女共同参画を推進していくために「原子力機構男女共同参画推進目標」を定めました。目標では、女性職員の採用やキャリア育成をはじめ、必要な制度、環境の整備、理解促進等に積極的に取り組んでいくことを示しています。

### 女性職員の採用促進

当機構におけるこれまでの採用状況を踏まえ、『優秀な女性職員の採用拡大に向けた取り組みを強化し、大卒以上の採用において研究職、技術職の女性採用比率を 13% 以上とする』という目標を定めました。

具体的な取り組みとしては、採用活動において、当機構の男女共同参画推進について積極的に PR するとともに、採用活動の対象範囲を拡大し、理工系学部のある女子大学へのアプローチ、当機構主催の女子学生を対象とした新卒採用説明会等を行っています。

### 女性職員のキャリア育成

女性職員のキャリア育成を支援するために『女性職員の活用に係る理解促進や、女性職員のキャリアコンピテンシー（自律的なキャリア形成力）を向上する策を講じていきます。具体例としては、キャリアコンピテンシー向上に係る主要策の一つであるメンター制度について、平成 21 年度までに整備する。』という目標を定めました。この目標では、男女共同参画推進の必要性の理解促進を図るとともに、女性職員が自らのキャリアを考える上で参考となるロールモデルが少ないという状況を受け、女性職員の育成支援に係る具体策を講ずることを掲げています。

主要策の一つであるメンター制度は、直属の上司による業務上の指導とは別に、メンター（よき指導者）が後輩職員であるメンティー（助言を受ける者）から話を聴き、日常における不安解消および成長の支援を行う制度であり、今年度、若手の女性職員を対象に試行運用することになりました。その一歩として、6 月 12 日～13 日にメンター研

修を実施し、平成 21 年度の導入に向けスタートしました。よりよい制度となるために、対象者の意見を取り入れながら、メンター制度の正式導入に向け準備を進めています。

また、女性職員のさらなる意識向上や女性職員同士のネットワーク形成を目的とし、研修（講演、セミナー等）等を積極的に行っていきます。

### 職場環境等の整備

男女に関係なく、職員一人ひとりが、能力と意欲をもって希望に沿った形での仕事と家庭生活を調和できるような環境の整備と実現は、機構の活力の維持、向上にとっての重要な課題となっています。そこで、『ワーク・ライフ・バランス（仕事と家庭生活の両立）のための支援策を拡充する。』という目標を定めました。

今後、ワークライフバランス（仕事と家庭生活の両立）に対する理解促進、意識向上を図るとともに、制度の見直し、改善を図っていきます。

### 男女共同参画に係る理解促進

男女共同参画を推進していく上で、機構内における意識を高め、理解を促進する策を講ずることが必要です。今後、講演会および研修などで、理解促進を図っていきます。

当機構は、男女共同参画を推進し、男性、女性ともに互いを尊重し、それぞれの個性、能力に応じ、その力を発揮し、ともに責任を担い、利益を享受できる組織づくりに積極的に取り組んでいきます。



メンター研修



女子学生対象説明会

## 山東 昭子参議院副議長が東海地区を視察

6月27日、山東 昭子参議院副議長が、東海地区の J-PARC（大強度陽子加速器施設）および東海研究開発センター原子力科学研究所 研究炉 JRR-3 をご視察されました。

J-PARC では、物質・生命科学実験施設、50GeV シンクロトロン、原子核素粒子実験施設をご案内し、今年12月の施設供用開始に向けた施設の状況などをご覧いただきました。また、J-PARC の目指す最先端の研究開発や産業界等における利用促進についてご紹介しました。

JRR-3 では、施設をご覧いただくとともに、中性子利用におけるこれまでの成果と今後の研究開発についてご説明しました。

ご視察後に山東参議院副議長からは、J-PARC センターには「夢」を、そして原子力機構職員一同には「挑戦」と「愛」という激励の書を色紙にしたためていただきました。



お書きいただいた激励の言葉とともに

## タイ王国の研修生が原子力機構で原子力広報の研究活動に取り組む

文部科学省の原子力研究交流制度に基づいて、タイ王国の研修生 Ketvarong NUKULKIJ さんが平成20年7月から1ヶ月間、原子力機構広報部で原子力広報についての研究活動に取り組みました。

研究活動は、できるだけ原子力機構が行う広報活動の生の現場に触れてもらおうと、科学実験教室、施設見学会、マスコミとの懇談会、プレス発表等の現場に同行して見てもらいました。

タイ王国においては、今後原子力発電所の建設に取り組むところであり、原子力の広報活動の重要性が高まっている。Ketvarong さんは、日本での研究活動を通じて得られた広報活動についての知見を自国の原子力の発展のために生かしていきたいと期待を膨らませていました。



敦賀本部 ナトリウム取扱研修施設において高校生とナトリウム研修をする様子

## 青少年のための科学の祭典 2008 全国大会に出展

7月25～27日、科学技術館（千代田区北の丸公園内）において、青少年のための科学の祭典 2008 全国大会が開催されました。原子力機構からは、「霧箱を作って放射線を観察しよう!」と「永久磁石を作ってコイルモーターを回そう!」の2つのブースを出展しました。実験に参加する人で多くの行列ができ、約600名が実験を行い、科学の不思議に触れていただく良い機会となるとともに、理数科教育支援の一助となりました。

科学の祭典は、今年で17年目を迎え、文部科学省、日本科学技術振興財団が主催となり、多くの青少年に自然科学の面白さを体験してもらうことを目的に開催しており、3日間で約3万人の来場がありました。



原子力機構ブースでの実験の様子

## 半導体スピントロニクス材料実用化へのブレークスルー —動作温度上昇への鍵を放射光が解明—

原子力機構 量子ビーム応用研究部門の竹田 幸治任期付研究員らは、東京大学および広島大学と共同で、半導体スピントロニクス材料として注目されている希薄磁性半導体が、半導体結晶格子の隙間に入り込んでしまった磁性原子によって、その磁気特性が大きく低下する機構を解明しました。

今回、当研究グループは大型放射光施設 SPring-8 からの円偏光を用いた軟 X 線磁気円二色性の測定をガリウムマンガニヒ素に対して行い、磁性原子であるマンガニ原子だけの磁氣的性質を詳しく調べました。その結果、ガリウムと入れ替わったマンガニが強磁性になろうとする一方で、結晶格子の隙間に入り込んだマンガニは、同じマンガニであるにもかかわらず、強磁性を打ち消す働きをし、動作温度を下げていることが明らかになりました。

この結果は、ガリウムマンガニヒ素を用いた半導体スピントロニクス材料の実用化のためには、結晶格子の隙間に入り込むマンガニをなくすことが重要であることを意味しており、今後の半導体スピントロニクスを実現する材料開発に明確な指針を与えるものです。



# TIARA イオン照射研究施設

高崎量子応用研究所



## ● 概要

TIARAには、サイクロトロン、タンデム加速器、シングルエンド加速器、イオン注入装置の4種類のイオン加速器が備えられており、2万電子ボルトから10億電子ボルトまでの幅広いエネルギー範囲のイオンビームをつくり出すことができます。

高崎量子応用研究所 ホームページ

<http://www.taka.jaea.go.jp/>



独立行政法人

**日本原子力研究開発機構**

広報部 広報課

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番49

TEL 029-282-1122(代表)

JAEAホームページ <http://www.jaea.go.jp>



JAEAニュースは再生紙と  
アメリカ大豆協会認定の大豆油インクを使用しています。