

元素の起源から物質創成の解明を目指す物理科学研究

Physical Science Research

物質の創成研究

Study on Genesis of Matter

代表研究者 本 林 透

MOTOBAYASHI, Tohru

(重イオン核物理研究室)

(Heavy Ion Nuclear Physics Laboratory)

研究サブテーマ主担当者：山崎（山崎原子物理研究室）；旭（旭応用原子核物理研究室）；本林（本林重イオン核物理研究室）；吉田（吉田植物機能研究室）

物質は、最小の化学単位としての元素によって形成されている。元素の起源は宇宙がその進化を遂げる過程での物理現象にある。元素は原子核と電子が結合した原子の形で存在し、原子核は核子の集合体である。核子はクォークがグルーオンによって結合されたものであり、質量はその結合によって発生する。このように、物質は様々な階層によって構成されている。

本研究では、各階層の粒子の性質を知ることだけではなく、(1) 階層間の関連を探り、(2) 宇宙における元素合成を総合的に研究し、(3) 反物質を通して自然の対称性を検証することによって物質の創成を解明するとともに、(4) その成果の利用を図る。そのため、「反物質利用技術開発研究」、「極小からのアプローチ」、「極大からのアプローチ」、「元素・原子核の利用研究」の4つのサブグループによって物質の創成を総合的に解明する研究を推進する。

1. 極小からのアプローチ

(1) 超弦理論真空での物質生成

研究担当者：川合、多田、早川（川合理論物理学研究室）

ビッグバンから始まる宇宙初期においては、まず無の状態すなわち真空からクォークやグルーオンなどの素粒子が作られ、それらが核子、原子核、原子という各階層を経て現在この宇宙に存在する物質を作り上げている。本年度は、超対称ゲージ理論に様々な物質場を加えた場合の行列模型との双対性の研究や、行列模型の非摂動効果の源を探る研究を行った。これによって新しい物理の発見と新しい観点からの次の階層における具体的な実験研究への展開を目指している。

(2) 高偏極・超低エネルギー不安定核ビームの開発

研究担当者：旭、上野、吉見、内田^{*5}、小林、長谷山^{*1}、渡邊（寛）^{*2}、三好^{*3}、亀田^{*3}、島田^{*4}、長江^{*3}、江守^{*3}、加藤^{*3}、木島^{*3}（旭応用原子核物理研究室）

大きくスピン偏極した原子核は基本的対称性の研究および原子核構造の研究において極めて有用である。本研究では原子線法を利用した高偏極、超低速不安定核ビーム生成

装置の開発研究を進めている。本装置は入射核破碎反応で生成される高エネルギーかつ広運動量幅の不安定核ビームを効率良くガス中で停止させ、原子線法偏極装置に輸送し不安定核のスピン向きを選別して実験装置に供給し、物性、核構造、基礎物理の研究を幅広く行うことを目的としている。

本年度は入射ビームを停止させ、停止イオンを直流電場で下流にドリフトさせる部分、またノズルを通じてガスジェット気流とともに真空領域へ引き出す部分の改良を行い、各部分での輸送効率を向上させた。不安定核分離装置 RIPS から輸送された³⁰Al ビームをエネルギー減衰器で減速させて、Ne ガス 600 torr で満たされた停止チェンバーに入射させた。He より重い Ne を用いることで効率良く入射ビームを停止させることができ、静電場による輸送の効率測定が精度良く行えるようになった。³⁰Al の崩壊時の β 線の放出分布を測定することにより停止した Al 元素がイオンのまま電場で輸送される効率を測定し、(72 \pm 4)%を得た。また停止・ドリフト部から後段部へのイオン引き出しの測定は、アーク放電でイオン化された窒素分子を用いて行った。窒素ガス 150 torr で満たされたドリフト部の最下流において強い電場で収束された窒素イオンは Laval 型のガラス製ノズルを通じて 10⁻² torr の真空領域へガスジェット気流とともに引き出される。電流測定でノズル直前・直後の窒素イオンの流量計測を行い、直径 1 mm のノズルを用いて現時点でノズル部の引き出し効率 4%を得ている。原子線法に適用するにはこの引き出されたイオンを中性化させることが必要になる。引き出されたイオンにイットリウム管を通過させ、荷電交換により通過イオンを中性化させるシステムの製作を行った。イオンがイットリウムに接触する効率を増すために、管にバイアス電圧 -200 V を印加している。中性化領域の下流で中性化された窒素のみを四重極質量分析器を用いて計測して、中性化効率を見積もる。解析が進行中であるが、現時点で、イットリウム管使用の効果が有意の差で確認できている。

(3) K 中間子とヘリウム 3 の束縛状態

研究担当者：岩崎、應田、松田、板橋、岡田^{*1}、鈴木（隆）^{*1}、友野^{*2}、佐藤^{*6}（岩崎先端中間子研究室）

本研究では、高エネルギー加速器研究機構（KEK）にお

いて負電荷の K 中間子とヘリウム原子核との反応で発生する陽子を観測することによって、世界で初めて、ストレンジ・トライバリオン- $S^0(3115)$ -を発見した。

現在知られている最高密度の物質は原子核で（天体現象を除く）、これは陽子や中性子などが湯川の予言した π 中間子で結びつけられたもので、その密度は原子核によらず一定不変である。今回の発見は、中間子を原子核内に埋め込むことによって原子核の構成要素が異常に強く束縛し、それに伴い自発的に通常の原子核密度を超える超高密度状態が形成されるとの理論的予言に従って解釈することができる。分かりやすく考えると、中間子が“触媒”となって、原子核の構成要素である陽子や中性子が引き寄せられることで、超高密度のバリオン状態が作り出されたと解釈される。

この成果は、これまで原子核の密度が一定不変とされてきた常識を覆し、中間子が超高密度状態を作り出すことを見いだしたものである。また、素粒子の中でもハドロンは、それを取り巻く環境により質量が形作られると考えられていることから、不変と考えられてきたハドロン質量の変化を直接観測するというこれまでにない学問領域を拓くことも期待される。今後の実験的・理論的研究の進展により、高密度天体現象や、ハドロン質量の起源の研究への貢献は非常に大きいと考えられる。

(4) 中性子過剰核の密度分布と核物質の状態方程式

研究担当者：本林、須田、小濱、竹田^{*1}、大西^{*1}（RI ビーム科学研究所）

陽子弾性散乱により中性子過剰核の核子密度分布を実験的に決定し、非対称系での核物質の状態方程式を決定する。安定核では豊富な実験データが存在することもあり状態方程式の理解は進んでいるが、中性子と陽子のバランスの崩れた非対称系では、原子核を記述するモデルによって予言される状態方程式、例えば飽和密度、が大きく異なる。飽和密度の違いは、核半径や密度分布に影響が現れたため、中性子過剰核や陽子過剰核の半径や密度分布の測定から非対称核子系の状態方程式の情報を得ることができる。

世界最強度のビームが得られる RI ビームファクトリーにおける中間エネルギーの陽子弾性散乱によって、原子核の密度分布を決定する。陽子弾性散乱断面積の角度分布を測定するため、陽子標的に不安定核ビームを照射する逆運動学で実験を行う。高精度の密度分布決定のためには、可能な限り広い角度範囲を覆った測定が必要であり、我々は、この実験に必要な固体水素標的および検出器系の製作を進めている。以下に本年度達成したことを述べる。

(i) 固体水素標的：KEK 低温グループと共同で、窓無し 1 mm 厚の固体水素標的の開発を進めている。既に我々は窓なし 3 mm の固体水素標的の生成に成功しているが、低エネルギー反跳陽子が標的中で受ける多重散乱の影響を小さくするため、より薄い標的が必要である。また、薄膜を用いた窓あり 3 mm の標的を現施設における不安定核実験に用い、安定な動作を確認した。

(ii) 反跳陽子検出器：ドリフトチェンバーと NaI(Tl) 検出器からなる検出系で、反跳陽子の放出角度および運動エネルギーを測定する。本年度は検出器用真空チェンバーを製作した。また、昨年度に引き続き NaI(Tl) 検出器のエネルギー応答の測定を 12 MeV 陽子ビームを用いて行った。

(iii) 前方反跳陽子検出器：CM 系前方測定に用いる、Si

Strip 検出器と Si(Li) 検出器を用いた測定系の構築を進めている。本年度は Si Strip 検出器の製作を行い、その評価を行った。

(iv) 放医研テスト実験：システム全体の総合評価を、放射線医学総合研究所にて行うべく準備を進めている。本年度はビームライン用位置検出器の評価を行い、そのデータをもとに本実験用検出器の製作を進めている。

このように実験に必要な検出器の製作をほぼ終了し、2007 年度開始予定の RI ビームファクトリーへの準備がほぼ整いつつある。また、理論研究も進行中で、実験データから核子密度分布を導出するための解析方法の確立、非対称系の状態方程式パラメータと半径や質量との関係、状態方程式と密接な関連のある超新星爆発や中性子星について研究を行った。

^{*1} 基礎科学特別研究員、^{*2} 協力研究員、^{*3} 研修生、^{*4} 技術研究生、^{*5} 共同研究員、^{*6} ジュニア・リサーチ・アソシエイト

2. 極大からのアプローチ

(1) 元素合成に関連した核反応と核分光

研究担当者：本林、青井、櫻井^{*1}、武内^{*3}、Fulop^{*6}、柳澤、五味^{*2}、峯村^{*5}、山田^{*2}、岩佐^{*5}、今井^{*5}、Bishop^{*6}、馬場^{*4}、Elekes^{*7}、福田^{*2}、家城^{*5}、岩崎^{*5}、中村^{*5}、斉藤^{*4}、黒川^{*3}、菅野^{*8}、近藤^{*4}、栗田^{*5}、杉本^{*8}、Gibelin^{*4}、河合^{*4}、石川^{*4}、松井^{*4}、森川^{*4}、鈴木（宏）^{*4}、梶野^{*4}、山口^{*4}、鈴木（健）^{*5}（本林重イオン核物理研究室）；石原、竹下^{*8}（加速器基盤研究部）；寺西^{*5}、下浦^{*1}、久保野^{*5}、太田^{*4}、新倉^{*5}、野谷^{*5}（加速器利用研究グループ）

加速器研究施設において、高速 RI ビームを用いた実験を行うとともに、測定装置開発を行った。

(i) rp 過程陽子捕獲反応のクーロン分解法による決定

昨年度行われた不安定核 ^{23}Al 、 ^{27}P のクーロン分解反応の実験結果をもとに、爆発的水素燃焼過程の天体核反応率の決定を行った。 $^{22}\text{Mg}(p,\gamma)^{23}\text{Al}$ 反応については、実験的な値を得ることに初めて成功し、この反応が新星での核燃焼に寄与する条件を明らかにした。 $^{26}\text{Si}(p,\gamma)^{27}\text{P}$ 反応については、共鳴からの γ 線放出に M1、E2 の 2 成分あることから、反応率の上限と下限を与えた。

(ii) クーロン分解反応機構の研究

連続状態を経由するクーロン分解反応では、陽子捕獲の主成分である電気双極子 (E1) 遷移が強く起きるが、他の遷移多重度 (M1、E2) および、核力励起の寄与も含まれ、しかも、その割合が陽子捕獲の場合と異なる。特に近年の太陽ニュートリノ問題のように、高精度（典型的には 5%）の結果を要求される場合は、これらの小さな寄与の推定が必要である。 ^8B 核のクーロン分解反応における M1、E2 および核力励起の寄与を求めるため、従来行った鉛標的に加えて、水素およびヘリウム標的による分解反応の実験を行った。3 つの標的による結果の比較と角度分布の詳細な分析から、各成分の寄与を引き出すことを目指している。現在データの解析を行っている。

(iii) クーロン分解法による 2 陽子捕獲反応の実験

昨年度行った ^{20}Mg の鉛標的による 2 陽子放出分解の実

験データの解析を行った。まず、 ^{20}Mg 核そのものの性質を調べる目的で 2^+ 状態からの γ 崩壊を分析し、鏡核 ^{20}O との比較を試みた。

(iv) ビームライン検出器系の開発

RI ビームの識別能を高めるため、結晶軸を傾けた検出器を設計し、期待される性能を発揮することを確認した。また、高強度のビームを計数するため、高速の増幅器系を整備した。

(2) 宇宙の高温領域から放出される X 線・ガンマ線の観測

研究担当者：牧島，三原，玉川，寺田，加藤，高橋，小浜^{*2}，久保田^{*2}，太田^{*2}，馬場^{*2}，坂本^{*3}，洪^{*8}，中島^{*8}，浦田^{*4}，岡田^{*4}（牧島宇宙放射線研究室）

宇宙の重元素の大半は、銀河群や銀河団に附随する高温プラズマに含まれるので、このプラズマの組成を知らずに宇宙の元素合成を論じることにはできない。我々は「あすか」（1993～2001）、Chandra（米；1991～）、XMM-Newton（欧；1999～）などの X 線衛星を用い、銀河団プラズマ中の重元素が発する特性 X 線の計測を続けて来た。その結果、酸素は銀河団の周辺部まで分布するのに対し、シリコンや鉄はより銀河団の中心に集中し、また星の分布はさらに集中が強いという確証を得つつある。これは第 1 世代の大質量星が、重力崩壊型の超新星爆発により酸素など軽いアルファ元素を大量に放出し、そのうち銀河がプラズマの抵抗を受けて銀河団ポテンシャルの中心へ徐々に落下する間に、後続の世代の星が核反応暴走型の超新星爆発により、シリコンや鉄を銀河間空間にまき散った結果と考えると、よく理解できる。

第 1 世代の星は重元素の無い環境で形成されるため、大質量になり、崩壊して異常に重いブラックホールを形成する可能性がある。我々は「あすか」の観測により、近傍銀河に見られる超大光度 X 線源（ULX）が、そのような過程などで作られた「中質量ブラックホール」で、大量の質量降着により X 線で強く輝いているという、独創的な説を世界に先駆けて提唱している。本年度は、その可能性をさらに強化した。我々はまた運用中の HETE-2 衛星を用い、1960 年代以来の謎であったガンマ線バースト現象は、そうした大質量星の重力崩壊やブラックホールの形成に伴って発生することを、ほぼ確実なものとした。

超新星爆発の機構をより直接に検証するには、爆発に伴い合成される不安定同位体からの崩壊信号を検出することが有効で、特に若い超新星残骸の中でチタン 44 の発する 68 keV と 78 keV のガンマ線は、有望視されている。我々はチタン 44 に優れた感度をもつ硬 X 線検出器（HXD; Hard X-ray Detector）を、東京大学、宇宙航空研究開発機構（JAXA）、広島大学、埼玉大学、金沢大学、青山学院大学、Stanford 大学などと協力して開発してきた。HXD は「あすか」の後継機である Astro-E2 衛星に搭載され、2005 年初夏、JAXA により打ち上げ予定である。本年度は HXD の実機を完成させ、7 月より衛星に搭載して必要なすべての試験を完了し、打ち上げ準備を整えた。

^{*1} 客員主管研究員，^{*2} 基礎科学特別研究員，^{*3} 協力研究員，^{*4} 研修生，^{*5} 共同研究員，^{*6} 客員研究員，^{*7} 訪問研究員，^{*8} ジュニア・リサーチ・アソシエイト

3. 反物質利用技術開発研究

(1) カスプトラップによる偏極反水素生成

研究担当者：毛利^{*1}，金井，黒田^{*2}，柴田^{*3}，永田^{*4}，山崎（山崎原子物理研究室）

2 つの薄型超伝導ソレノイドコイルを組み合わせることでカスプ磁場を形成し、これと 8 重極電場を組み合わせ、陽電子と反陽子の同時閉じこめを実現すると共に、これを用いてスピン偏極した反水素を捕捉、また、ビームとして引き出し、反陽子の磁気モーメントを高精度決定する研究を進めている。本装置の特徴は、正負両極性の荷電粒子を同時に同じ領域に捕捉でき、さらに反水素のように磁気モーメントを持った中性粒子をも閉じ込めることができる点にある。これは、従来進められてきた反水素生成法とは比較にならない優れた基本的特性となっている。本年度は、カスプトラップ中に電子を高密度で安定に捕捉することに成功し、ついで、捕捉された電子プラズマを引き出し、その二次元分布の時間発展を観測することにより、電子プラズマの空間密度分布がどのように変化するかについて、詳細な情報を得た。同時に、3 K 程度まで冷却可能なコールドボアを設計製作し、冷たい水素合成の準備を進めている。

(2) 反陽子大量捕捉スキームの確立

研究担当者：黒田^{*2}，柴田^{*3}，永田^{*4}，山崎（山崎原子物理研究室）

CERN（ヨーロッパ合同素粒子原子核研究機構）の AD（反陽子減速器）から供給される 5 MeV のパルス反陽子ビームを RFQD（高周波 4 重極減速器）で 100 keV 程度まで減速し、これを精度良く MRT（大容量多重電極トラップ）に導くことにより、反陽子を大量に捕捉し、冷却することに成功した。さらに、冷却後の反陽子の空間分布をアクティブにコントロールする手法を開発し、これにより、これまで困難であった超低速反陽子の単色ビームを非常に高い効率で引き出すことに成功した。これにより超低速反陽子を用いる多方面の研究を新しいフェイズに導いたと考えている。

(3) 冷たい反水素生成と生成過程の研究

研究担当者：藤原^{*5}，山崎（山崎原子物理研究室）

いわゆる入れ子構造の電磁トラップを用い、陽電子と反陽子を捕捉し、これをうまく混ぜ合わせることで反水素生成過程の研究を進めている。本年度は、反水素生成効率の温度依存性、反陽子の陽電子による冷却過程をつぶさに調べた。また、反陽子合成を確認するために用いている位置検出器を駆使することにより、捕捉中の反陽子が特定のトラップ電極のそれも非常に限られた場所で消滅していることを明らかにした。これは反水素合成のみでなく、一般の非中性プラズマ研究にも重要な情報を与える画期的な研究となっている。

^{*1} 研究嘱託，^{*2} 協力研究員，^{*3} 基礎科学特別研究員，^{*4} 研修生，^{*5} 共同研究員

4. 元素・原子核の利用研究

(1) 不安定原子核をプローブとした物質構造の研究

担当者：旭，小林（義），上野，吉見，長谷山^{*1}，渡邊（寛）^{*2}，岡田^{*5}，久保^{*5}，山田（康）^{*5}，村田（昌）^{*5}，栄長^{*5}，永田^{*5}，谷口^{*5}，小島^{*5}，倉橋^{*5}，八木^{*5}，吉

田(豊)*⁵, 小川(博)*⁵, 浅井*⁵, 中村*⁵, 那須*⁵, 宮崎*³, 藤田*³, 根本*³, 野中*³, 田口*³, 川口*³, 神保*³, 小野*³, 大久保*³, 仲本*³, 三好*³, 亀田*³, 島田*⁴, 加藤*³, 江守*³ (旭応用原子核物理研究室); 羽場*², 吉田(敦), 加瀬, 後藤, 矢野 (加速器基盤技術部)

加速器からの不安定核ビームまたは原子炉の中性子ビームを利用したインビーム・メスバウアー研究を継続して進展させた。高励起状態にある孤立した金属原子やイオンは、通常の化学反応とは全く異なる exotic な生成物や化学種をもたらすことが期待できる。これまでに、短寿命不安定核 ^{57}Mn ($T_{1/2} = 1.45\text{ m}$) を用いる「インビーム・メスバウアー分光法」を応用し、 KMnO_4 中で異常酸化状態 Fe(VIII) の $[\text{FeO}_4]$ が生成されることを報告した。この系は $[\text{MnO}_4]^-$ 中の Mn 位置に捕捉された ^{57}Mn を起源とするため、結晶中での四面体構造を保持した Fe-O 化学種であり、低温ガスマトリックス単離実験のように完全孤立系を仮定することは難しい。本年度は、固体酸素に ^{57}Mn を直接注入し、約 2 分後に生成される ^{57}Fe のインビーム・メスバウアースペクトルを観測した。液体ヘリウムで 18 K に冷却された Al 基板上に、高真空を保持しながら O_2 ガスを吹き付け、凝集させることにより得た固体酸素試料に ^{57}Mn を直接イオン注入し、インビーム・メスバウアー測定を行った。18 K で得られたインビーム・メスバウアースペクトルは、4 組のダブルレットとして解析することができた。それらの生成化学種は、メスバウアーパラメータおよび分子軌道計算 Gaussian から、 $\text{Fe}(\text{O}_2)$, FeO , $(\text{O}_2)\text{Fe}(\text{O}_2)$ および高原子価状態にある Fe であると帰属できた。 $(\text{O}_2)\text{Fe}(\text{O}_2)$ は、本実験で初めて実験的に検証された化学種である。シリコン中の超微量 Fe 不純物の拡散挙動の研究にも、 ^{57}Mn インビーム・メスバウアー分光法を応用した。格子間隙位置の Fe 原子は 500~600 K で頻度の高い原子ジャンプを繰り返し、600 K 以上になると格子欠陥と再結合し、格子間 Fe 原子は格子位置に置換するという拡散現象を実験的に見出すことに成功した。今回の一連の ^{57}Mn 実験では、一次ビーム粒子を従来の ^{59}Co から ^{58}Fe に変更し、また前段加速器を AVF サイクロトロンから線型加速器に変更したことにより、得られる ^{57}Mn の個数と純度が格段に有利となり、より S/N 比の優れたスペクトルを得ることに成功した。

(n, γ) 反応とそれに引き続いて起こるカスケード γ 線放出の反跳によって生成するホットアトムの挙動や核反応直後の原子価状態を非破壊的に追跡できる中性子インビーム・メスバウアー実験を行った。日本原子力研究所 JRR-3M ビームホールの即発 γ 線分析装置を利用し、二硫化鉄 (FeS_2) を試料として中性子インビーム・メスバウアースペクトルを測定した。 $^{56}\text{Fe}(\text{n}, \gamma)^{57}\text{Fe}$ 反応によって生成した ^{57}Fe の 14.4 keV の第一励起準位を線源とし、検出器は平行平板型電子雪崩検出器を用いて、室温で実験を行った。マトリックスとなる FeS_2 は、 Fe^{2+} と S_2^{2-} が NaCl 型の結晶構造をとり、鉄は 2 価低スピンである。得られた中性子インビーム・メスバウアースペクトルは二組のダブルレットが観測された。面積強度の 1/3 を占める成分はホストマトリックスの FeS_2 と考えられるが、残りの 2/3 の成分は、原子核反応直後の原子の反跳によって生成した新たな成分であることが示唆された。このような極端な非平衡状態では、種々の化学種が生成し存在するものと予想されていた。しかし、新

規生成化学種はメスバウアー分光の時間スケール (140 ns) では一種類しか存在しないことを明らかにした。

加速器を利用しないと線源調整が不可能な ^{99}Ru ならびに ^{83}Kr メスバウアー分光研究を進展させた。 ^{99}Ru メスバウアー分光研究では、理研 AVF 加速器からの陽子ビーム ($E = 12\text{ MeV}$) を ^{99}Ru 金属に照射し、(p, n) 反応によりメスバウアー線源 ^{99}Rh (半減期 15 日) を調製した。これを用いて、(Ca, Sr) RuO_3 系の磁気基底状態と反強磁性発現機構ならびにスクッテルダイト $\text{SmRu}_4\text{Sb}_{12}$ の熱電特性解明する目的で研究を行った。一方、 ^{83}Kr メスバウアー研究では、 CaBr_2 に α 粒子 ($E = 25\text{ MeV}$) を照射し ($\alpha, 2\text{n}$) 反応で生成する ^{83}Rb (半減期 86 日) を調整し、これを放射化学的手法により分離して ^{83}Kr メスバウアー線源を作製することに成功した。

^{57}Fe メスバウアー分光も継続して行った。 π 共役系フェロセン-アントラキノンまたはフェロセン-ナフトキノン接合分子における分子内でのレドックス挙動やプロトンーション駆動に伴う電子移動や鉄の原子価状態の関係を調べ、キノンの構造や接合位置による物性交換挙動を観測した。非ヘム鉄酵素から生成する参加活性種に関するモデル実験としてサレン錯体を用いた活性種とその反応性に関する研究を行った。鉄材料表面に形成されたオキシ酸鉄の超微細磁場の大きさについての研究を行った。

セリウム (Ce) を含む多くの化合物は、物質の組成、温度、磁場、圧力などの条件により強磁性や反強磁性などの磁気秩序や四極子秩序、近藤効果、さらには異方的超伝導などの多彩な性質を示すことが知られている。これらの物性は主に、Ce 原子が持つ 4f 電子と他の構成原子の伝導電子との間の直接および間接的な相互作用に強く依存している。本研究では、Ce 核位置での微細な情報を得ることを目的として、 ^{134}Ce 核異性体ビーム ($I^\pi = 10^+$, $T_{1/2} = 308\text{ ns}$, $g = -0.183$) の開発を行っている。核スピン整列した ^{134}Ce 核異性体ビームを Ce 化合物にインプラントし、 γ -TDPAD 法を使い hyperfine field や緩和時間を測定することにより、4f 電子の挙動が強く反映される Ce 核位置での磁気モーメントの大きさや電子間相互作用の強さなどの微視的な情報を得ることができる。本年度は γ -TDPAD 測定に使用するターゲットチェンバーや検出器架台、NaI 検出器用磁気シールド等の開発を行った。また、ビームラインの整備およびビーム生成のシミュレーションを行い、核異性体ビームを供給可能な段階までに至っている。

(2) 次世代マルチレーザー技術の創出とその応用研究
研究担当者：榎本, 羽場, 本村*¹, 五十嵐*², 蛭沼*², 金山*⁶, 篠原*⁵, 永目*⁵, 横山*⁵, 鷲山*⁵, 天野*⁵ (加速器利用展開室); 加治*¹ (ビーム分配技術開発室)

当研究グループでは、理研が開発したマルチレーザー法の製造技術の高度化 (マルチレーザー製造技術, シングルトレーザー製造技術, RI カクテル製造技術), マルチレーザーならびにシングルトレーザーによる化学, 生物学, 医学, 環境科学分野への応用研究, マルチレーザーの新規計測法の開発 (複数核種同時ガンマ線イメージング装置 GREI の開発) を行っている。

本年度は、短寿命マルチレーザー製造を目的としたガスジェット結合型多重標的照射装置と、大強度ビーム対応型長寿命マルチレーザー製造装置の複合型照射装置を新規

開発した。ガスジェット結合型多重標的照射装置では、生成したマルチトレーサーを、ガスジェット法によって照射室直下のホットラボ室へ輸送し、ガラスフィルターに捕集することにより、化学分離不要の短寿命マルチトレーサーが製造できる。これを任意の溶液に溶解することによって直ちに応用研究可能なマルチトレーサー溶液が得られる。本装置によって周期表上のあらゆる元素を標的にでき、また、標的構成を変えることでマルチトレーサーに含まれる核種の最適化が可能となった。一方、長寿命 RI の製造を目的とした大強度ビーム対応型長寿命マルチトレーサー製造装置では、旧落送球装置と同様にチタン、銀、金標的などを照射する。本装置は、マルチトレーサー製造効率を向上させるため、標的を水冷に加えてヘリウムガス冷却することにより、ビーム強度 $1\text{ p}\mu\text{A}$ で照射可能な装置となった。さらに、チャンバー全体を鉄とコンクリート遮蔽に閉じ込めることにより漏洩放射線の低減化に成功した。さらに、現有マルチトレーサーでは製造困難な銅、カドミウムなどの RI や、昨今入手困難となったセレンや亜鉛などの必須微量元素群の RI を製造することを目的として、理研 K70AVF サイクロトロンを用いて (p, n) や (p, α) などの比較的単純な核反応を用いて製造できるシングルトレーサーの製造技術開発を進めている。AVF サイクロトロンでプロトン照射した金属あるいは酸化物の標的を酸に溶解し、イオン交換法や溶媒抽出法によって目的 RI を精製する。本年度は、 ^{48}V , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{67}Cu , ^{88}Y , ^{89}Zr , $^{92\text{m}}\text{Nb}$, $^{95\text{m}}\text{Tc}$, ^{109}Cd , ^{175}Hf , ^{177}Ta ならびに ^{206}Bi などのシングルトレーサーを製造し、それらを用いた基礎研究を行った。

マルチトレーサーならびに AVF サイクロトロンで製造したシングルトレーサーを用いた応用研究は、生物学、化学、医学、環境科学領域などの多岐にわたった。以下に、代表的な成果をあげる。

(i) 当研究グループは、肝がんを含む多くの腫瘍の発症に関与しているとされる銅の蓄積機構と銅の関与する発がん機構の解明を目的として研究を継続している。本年度は、がんの蓄積機構では、AVF サイクロトロンを用いて銅の RI としては半減期が最も長い ^{67}Cu を製造し、肝がん由来細胞での銅の代謝経路を評価した。その結果、活性酸素種を消去するスーパーオキシドジスムターゼへ銅を輸送するタンパク質 (CCS) の欠損により銅が細胞内へ蓄積し、活性酸素種に起因する発がんを誘起していると考えられる結果を得た。発がん機構については、銅含有タンパク質であるメタロチオネインが DNA と結合し、DNA の近傍で最も反応性の高い活性酸素種であるヒドロキシルラジカルを産生することにより DNA を変異させ、ひいては発がんにつながると示唆される結果を得た。

(ii) 白金錯化合物であるシスプラチンは有用な抗腫瘍剤である。しかし、耐性が問題となっており、その原因としてシスプラチンの細胞内蓄積低下があげられる。当研究グループは、明治薬科大学との共同研究により、シスプラチン取り込み低下が原因と考えられるシスプラチン耐性細胞における金属取り込み機構を解明することを目的とし、マルチトレーサー法を用いて、取り込まれる金属種のスクリーニングを行った。本年度は、シスプラチン耐性肺がん細胞株とその親株を用いてマルチトレーサーによる核種取り込みを行った。その結果、耐性株において、Mn および Rb の

取り込みが亢進し、Co の取り込みが低下した。来年度は、これらの元素とシスプラチン輸送の関係を明らかにするためにシングルトレーサーを用いた検討および輸送タンパク質の探索を行う予定である。(iii) 近年、重い極限領域における原子の電子状態に関する情報を得ることを目的として、超重元素 (原子番号 104 番以上) の化学的性質を調べる研究が注目されている。 ^{89}Zr , $^{92\text{m}}\text{Nb}$, ^{175}Hf ならびに ^{177}Ta は、104 番元素ラザホージウム (Rf) ならびに 105 番元素ドブニウム (Db) の軽い同族元素の RI で、Rf や Db を模擬したイオン交換や溶媒抽出などの基礎実験を行った。その他、(iv) 嗅神経系を介した各種微量元素の脳内投射と移行、(v) カルノシンと鉄および微量元素の吸収における相互作用、(vi) ポリフェノールが鉄吸収に及ぼす影響、(vii) 胎仔および乳仔マウス脳内における各種微量元素の分布と代謝過程、(viii) パナジウム錯体および亜鉛錯体によるインスリン様作用と微量元素の動態、(ix) 妊娠ラットにおける各種金属元素の腸管吸収、(x) 亜鉛欠乏マウスの肝臓内における生体微量元素濃度の変化、(xi) 白内障モデル動物における水晶体への各種元素の蓄積性、(xii) 壊変系列中の Bi 同位体の核医学応用のための基礎検討、(xiii) 脳局所および腫瘍組織における微量元素の代謝挙動に関する実験的検討、(xiv) 酸化ストレス下における胆汁中の生体微量元素の動態解析、(xv) 花崗岩間隙水への各種元素の拡散、(xvi) Re と Os の堆積物への取り込み研究、(xvii) 土壌-植物環境における Tc および Re 等の挙動解明、以上に関する研究を行った。

(3) 遺伝的影響の分子レベルでの解析

研究担当者：花岡、古澤 (花岡細胞生理学研究室)；泉、塚田、富田、平山 (加速器利用展開室)；矢野 (加速器基盤研究部)；加瀬、龍頭 (ビーム分配技術開発室)；伊藤 (加速器支援展開チーム)；福西 (加速器技術開発室)

電離放射線による細胞致死効果の分子メカニズムを解明するため、最も重篤な損傷である DNA2 本鎖切断 (DSB) に対する細胞応答機構について検討を行った。DNA 依存性プロテインキナーゼ (DNA-PK) は、DSB 修復機構のひとつ、非同源末端結合 (NHEJ) において DSB のセンサーとして働く。X 線および重イオン線を照射した HeLa 細胞において、DNA-PK 特異的な XRCC4 のリン酸化は、照射 0.1~1 時間後では観察されるが、その後コントロールレベルにまで低下した。一方、照射 30 分後の XRCC4 のリン酸化は、LET が高くなるにしたがって高くなった。また、DNA-PK の触媒サブユニットである DNA-PKcs の自己リン酸化部位に対する抗体を作成し、自己リン酸化した DNA-PKcs が、重イオンの飛跡に沿って局在することを明らかにした。以上の結果などから、DNA-PK は、電離放射線の種類によらずに、DSB を効率的に認識して活性化することが示唆された。

(4) バイオクロストーク機能研究

(i) シロイヌナズナを用いた重イオンビーム照射変異体ライブラリの作出およびその評価

研究担当者：山本 *², 斉藤 (宏) *¹, 阿部, 吉田 (茂) (吉田植物機能研究室)

シロイヌナズナ種子を重イオンビーム照射により変異処理し、次世代 (M_2) の種子を大量調製した。約 7,000 粒の乾燥種子にネオンビームを 150 Gy 照射し生育して、得ら

れた種子 (M_2) は乾燥状態で低温保存した。処理した種子のうち 2,000 程度の M_1 系統を播種し、変異体の出現頻度を計測したところ、41 のアルビノ変異系統並びに、4 つの hy 変異系統 (光応答が鈍いために徒長する変異体) を同定した。

(ii) 変異遺伝子の迅速解析法に関する研究

研究担当者：松山、斉藤 (宏) *¹、市田 *³、白尾 *⁴、上野 *⁴、阿部、吉田 (茂) (吉田植物機能研究室)

本年度はバーチャル RLGS システムのプロトタイプを用いてシロイヌナズナ変異体の RLGS 解析を行った。その結果、マッピング技術と組み合わせることにより、ファインマッピングのステップを経ずに迅速に変異遺伝子にアプローチできることが判明した。特にドメインレベルで変異が起きている DNA メチレーションの変異同定には非常に有効であった。RLGS 法以外でも、① RAPD 法による重イオンビーム育種法によるキク新品種の特異的マーカー作出、② キャベツの AFLP マーカーによる萎黄病抵抗性マーカーの作出、について DNA 多型解析を試みた。② については有効な連鎖マーカーを開発した。

(iii) 重イオンビーム照射による変異植物体の作成

研究担当者：阿部、福西、龍頭 *²、斉藤 (宏) *¹、斉藤 (稔) *⁴、渡辺 *³、竹久 *³、佐藤 *⁵、亀谷 *⁵、島田 *⁵、村井 *⁵、原 *⁵、本多 *⁵、伊藤 *⁵、森下 *⁵、杉山 *⁵、金谷 *⁵、鈴木 (賢) *⁵、吉田 (拓) *⁵、鈴木 (一) *⁵、大澤 *⁵、吉田 (茂) (吉田植物機能研究室)

重イオンビーム照射の実用性を検討するため園芸植物や作物を対象として変異株作成を行った。本年度は、ソバ、イネ、ムギ、シバ、ピーマン、サツマイモ、キク、バラなどで変異形質の固定や遺伝子欠失系統の作出に成功した。

*¹ 基礎科学特別研究員、*² 協力研究員、*³ 研修生、*⁴ 技術研究員、*⁵ 共同研究員、*⁶ ジュニア・リサーチ・アソシエイト

Matter is composed of chemical elements, which originate from physical phenomena during the evolution of the universe. Chemical elements exist in the form of atoms, in which electrons and a nucleus are bound. The nucleus is composed of nucleons, or protons and neutrons, which are composed of quarks bound by gluons. This binding creates the mass. Thus matter exists in various hierarchies.

We study the genesis of matter in four sub-categories, Microscopic Approach, Macroscopic Approach, Developments of Applied Antimatter Science, and Application of Nuclear Science, which respectively study the relations between the different hierarchies as well as the properties of particles, nucleosynthesis in the universe, symmetries through antimatter, and applications of these studies to material science, biology and chemistry.

1. Microscopic Approach

(1) Creation of matter from superstring vacuum

We investigate the fundamental aspects of matter through the various methods of field theory and string theory. Our subjects are, for example, the further study of duality between the matrix model and the Supersymmetric Yang-Mills theory with various matter fields, and the origin of the nonperturbative effect of matrix models.

(2) Development of spin-polarized low-energy RI beams

We are currently developing a method to produce low-energy spin-polarized radioactive isotope (RI) beams. The low-energy spin-polarized RI beams are useful in various fields, such as materials science, nuclear physics and fundamental symmetry studies. Radioactive ions produced in the projectile fragmentation (PF) reaction at high kinetic energies are stopped in an inert gas buffering volume. The stopped RI ions are then extracted and transported towards a spin selection region, where a sextupole magnetic field is applied. In this fiscal year, we made several modifications to the previously constructed ion stop/drift system and the extraction system, in order to achieve an improved drifting/extracting capability. We used a beam of ^{30}Al to investigate the drifting of the stopped ions in the stopping chamber. The beam turned out to be efficiently stopped in the chamber filled with a stopping gas of Ne at 600 torr, and the drifting of the ions was successfully verified. The drifting was observed through detecting the distribution of β -rays emitted from the ^{30}Al activity. The obtained drift efficiency was $(72 \pm 4)\%$. The measurement of the efficiency for the ion extraction from the drifting chamber was made with N ions produced with the arc discharge method. The nitrogen ions were guided by strong electric field lines into an outlet orifice near the downstream end of the drifting chamber, and were extracted out using a flow of the carrier N_2 gas into an evacuated area (10^{-2} torr) through a Laval-type glass nozzle. The extraction efficiency at the nozzle was determined by measuring the ion current before and after the nozzle. The efficiency of 4% was obtained when a nozzle of diameter 1 mm was used. In order to apply the atomic beam resonance technique, the extracted ions needed to be neutralized. We fabricated a neutralization device. It includes an Yttrium tube on surface whose the charge exchange occurs. The neutralization efficiency is estimated by counting the neutral N atoms at the downstream of the neutralization area using a quadrupole mass spectrometer. The neutralization effect due to the presence of a Yttrium surface was clearly observed. Analyses are now in progress.

(3) Bound state between K-meson and triton (pnn)

We have discovered a totally new object, which consists of K^- pnn, named strange-tribaryon S^0 . The experiment (PS-E471) was performed at KEK, and the search of the system was performed by negative kaon at rest absorption-reaction in helium-4 target.

The highest density material (excluding the astrophysical system) is the nucleus, which consists of protons and neutrons, combined by the meson exchange force, and it is known that the densities of nuclei are universal and constant. The present finding can be understood through the theoretical prediction that the nuclear matter can shrink by the strong-attractive interaction between kaon and nucleon (proton and neutron), and that an extremely high-density system can be formed spontaneously. In the other word, K-meson is a catalytic agent to form high-density matter in the nucleus.

Presently it is widely accepted that the hadron (an elementary particle which consists of quarks) is formed and determined by the medium surrounding it. Therefore, the present finding indicates a totally new research field: the study of the “nature of mass formation” as a function of medium density. It will also possible to study astrophysical phenomena, such as the physics of the core of a neutron star, in laboratory experiments.

(4) Matter distribution of neutron-rich nuclei and Equation-of-State (EOS) for nuclear matter

The study of nuclear density distribution of unstable nuclei far from stability provides key information on the EOS (equation-of-state) for asymmetric nuclear matter. This is extremely important not only for nuclear physics but also for astrophysics.

It has been pointed out that different models for the nuclear-matter description, all of which give a consistent picture for the static properties of (symmetric) stable nuclei, predict very different EOS for asymmetric nuclear matter. The saturation density of asymmetric systems is one example. Different saturation densities predicted by different EOS give different nuclear size and/or different density distribution. The measurement of the density distribution of neutron- and proton-rich nuclei will thus make it possible to determine the EOS.

The nuclear density distribution is determined reasonably well by elastic proton scattering at intermediate energy. Theoretical studies reveal that an accuracy of 10% for the density distribution is required in order to constrain the EOS for asymmetric nuclear matter. This will be realized by experiments using an intense RI beam, available at the RI Beam Factory (RIBF).

We are developing a solid-hydrogen target system and a recoil-proton detection system for proton-RI scattering experiments. Since the energy of a recoiled proton under inverse kinematics tends to be small at forward scattering in a CM system, the thickness of the hydrogen target must be small enough to avoid an undesired multiple-scattering effect. Development of a windowless solid hydrogen target, 1 mm thick, is now underway with the collaboration of the KEK target group. This year, an experiment using this system was performed at RIKEN for the first time, and long-term stability was confirmed. The thickness of the target was 3 mm, and the thickness of the mylar window was 25 μm .

Identification of the elastic scattering channel requires a recoil-proton detection system with both high angular- and energy-resolution. To achieve high angular resolution, a set of drift-chamber systems is employed for tracking the recoiled-proton trajectory. The kinetic energy of the recoiled proton can be precisely measured using a set of NaI(Tl) calorimeters. In order to minimize the multiple scattering effect, a large-size vacuum chamber is installed between the solid hydrogen target and the detection system. This year, the vacuum chamber was designed and constructed. The energy calibration of all NaI(Tl) calorimeters using mono-energetic proton beam was completed.

The recoil-proton detection system including the windowless solid hydrogen is almost ready for use. In the next fiscal year, we will perform an experiment at HIMAC, where an intermediate-energy RI beam is available, prior to the experiments at RIBF.

2. Macroscopic Approach

(1) Nuclear reaction and nuclear spectroscopy for element genesis

The following experiments and developments have been performed by using fast RI beams.

(i) Radiative capture reactions in the rp process studied by Coulomb dissociation

Astrophysical reaction rates were obtained for explosive hydrogen burning based on the results of the Coulomb dissociation experiments with ^{23}Al and ^{27}P beams. For the $^{22}\text{Mg}(p, \gamma)^{23}\text{Al}$ reaction, the experimental rate has been obtained for the first time, and upper and lower limits were obtained for $^{26}\text{Si}(p, \gamma)^{27}\text{P}$.

(ii) Reaction mechanism of Coulomb dissociation

Though the main component of the Coulomb dissociation process through continuum states is by the electric dipole (E1) transition, other multipolarities (M1 and E2) and nuclear contribution might not be negligible. For astrophysical processes requiring a great accuracy, such as the ones related to the solar neutrino production, these small contributions should be evaluated. We performed Coulomb dissociation experiments with ^8B beams bombarding hydrogen and helium targets in addition to the previously studied lead. This is to extract M1, E2 and nuclear contributions contained in the $8\text{B} + \text{Pb}$ breakup data. Data analysis is in progress.

(iii) Two proton capture process studied by Coulomb dissociation

Data analysis of the $^{20}\text{Mg} \rightarrow ^{18}\text{Ne} + 2p$ Coulomb dissociation experiments performed in 2003. In order to study the properties of the nucleus ^{20}Mg , its $2^+ - 0^+$ γ -transition was studied to be compared with its mirror nucleus ^{20}O .

(iv) Development of a beam-line detector system

Ion implanted silicon detectors with their crystalline axes slightly tilted have been developed to avoid pulse-height defects due to the channeling effect. Their performance was successfully verified by a measurement with medium-mass RI beams.

(2) X-rays and gamma-rays cosmic hot plasmas

Through X-ray diagnostics of hot plasmas associated with clusters of galaxies, we have identified roles of the different types of supernovae. Our results on gamma-ray bursts in the distant universe and on ultra-luminous X-ray sources in nearby galaxies both have close relevance to core-collapse supernovae, which may have been common among the first generation stars. In an attempt to detect hard X-ray lines from Titanium 44 produced in recent supernovae, we have developed the Hard X-ray Detector, which will be carried onboard the Astro-E2 satellite scheduled for launch in the early summer of 2005.

3. Production of spin-polarized antihydrogen with a cusp trap

We have been developing a so-called "cusp trap", which consists of an anti-Helmholz superconducting coil and an electric octupole trap. The cusp trap has several unique features for the synthesis of antihydrogen atoms, i.e., a capability to simultaneously confine charged particles of both polarity and also neutral particles with finite magnetic moments in low-field seeking states. The time evolution of electron plasma in the cusp trap has been investigated for the first time. We have also designed a cold bore which fits to the cusp magnet so that antihydrogen atoms can be synthesized at a temperature low enough to be trapped.

Antiprotons (as many as 5 million particles) have successfully been trapped and cooled in a large multi ring trap. Further, we have also developed a technique to manipulate the antiproton cloud, which enables for the first time to extract a strong monoenergetic antiproton beam of 10–250 eV.

Antihydrogen atoms have been synthesized with a nested trap scheme. We have studied the temperature dependence of the production rate, and the cooling feature of antiprotons with the positron plasma.

4. Applications of elements and isotopes

(1) Applications of RI beams to condensed matter studies

In-beam Mössbauer spectroscopic studies using a beam of unstable short-lived nuclei ^{57}Mn ($T_{1/2} = 1.45$ min) have

been performed to investigate the “exotic” chemical states and the fast atomic-jump processes in solids. In this period, we have carried out a ^{57}Mn in-beam Mössbauer experiment to study the electronic structures, in particular the existence/nonexistence of an “exotic” chemical species, of ^{57}Fe atoms decaying from ^{57}Mn implanted into solid oxygen. From our previously obtained in-beam Mössbauer spectra for ^{57}Fe ($\leftarrow ^{57}\text{Mn}$) in KMnO_4 , the ^{57}Fe atoms occupying Mn sites in a $[\text{MnO}_4]^-$ tetrahedron were found to be in an unusually high valence state of Fe(VIII). In a more reactive matrix, Fe species with extraordinarily higher oxidation states and “exotic” chemical structures are expected to be produced. Reactions between localized Fe atoms and reactant O_2 molecules provide important information on chemistry under the non-equilibrium condition and on the production of the novel species. We succeeded to obtain well-defined in-beam ^{57}Fe ($\leftarrow ^{57}\text{Mn}$) Mössbauer spectra for solid O_2 at 18 and 30 K. The spectrum obtained at 18 K was successfully analyzed with four components of doublets. They were preliminarily assigned to be $\text{Fe}(\text{O}_2)$, FeO , $(\text{O}_2)\text{Fe}(\text{O}_2)$, and an exotic high oxidation state of Fe species. The ^{57}Mn implantation Mössbauer experiment was also applied to the diffusion study of Fe impurity in Si. From the temperature dependence of the areal intensities and the isomer shifts in the in-beam Mössbauer spectra, it is found that a fast diffusion of interstitial Fe atoms occurs over 500 K, and that there is a motional averaging between substitutional and interstitial Fe atoms in Si. In the series of ^{57}Mn in-beam Mössbauer experiments, an enriched ^{58}Fe -ferrocene compound was employed as an ion source. This lead to a large number of ^{57}Mn particles (approximately 5×10^6 particles per second), which was 20 times as many as that obtained in our previous experiments using ^{59}Co as an ion source.

Another type of in-beam Mössbauer study using a neutron beam was continued. The advantage of this technique is that it is possible to investigate non-destructively the chemical effects and dynamics of a hot atom produced after the nuclear reaction. The Mössbauer spectrometer using the prompt γ -rays was installed at a neutron beam line at JRR-3M, Japan Atomic Energy Research Institute. We succeeded to obtain in-beam Mössbauer spectra for FeS_2 at room temperature. The spectra were fitted with two doublets. One is originated from a host matrix of FeS_2 , while another is suggested to be a novel Fe species produced in the neutron capture reaction.

Mössbauer techniques with ^{99}Ru and ^{83}Rb , the Mössbauer nuclei that are only applicable at sites close to an accelerator, were developed. We studied the magnetically stable state and the antiferromagnetic ordering mechanism of $(\text{Ca},\text{Sr})\text{RuO}_3$ system. The characterization of a skutterudite $\text{SmRu}_4\text{Sb}_{12}$ was performed with the ^{99}Ru Mössbauer spectroscopy and magnetization measurement. A ^{83}Rb source for ^{83}Kr Mössbauer spectroscopy was produced by a chemical separation after the α -irradiation of CaBr_2 .

The ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy was applied to the investigation of the structural conversion and spin separation triggered by proton-coupled electron transfer in ferrocene-quinone system. Also, exotic valence states of Fe atoms in salen complex as a model for active sites of mononuclear non-heme iron enzymes were studied with the ^{57}Fe Mössbauer spectroscopy.

The inter-metallic compounds and alloys that include Ce as a constituent attract a great deal of attention because they exhibit various physical properties such as

ferro/anti-ferromagnetism, Kondo effect, superconductivity, and heavy-fermion behavior. In order to investigate the behavior of the 4f electrons around the Ce ion, which strongly affect the magnetism of the Ce-based compound, from the microscopic viewpoint, the development of a beam of spin-oriented ^{134}Ce isomers ($I^\pi = 10^+$, $T_{1/2} = 308$ ns, $g = -0.183$) is presently under progress. Information on the local magnetic moment at the Ce site and the effective exchange interaction between the 4f and conduction electrons of other inter-metallic constituents can be derived from the magnitude of hyperfine interaction and the nuclear spin relaxation time, respectively, using the γ -ray time-differential perturbed angular distribution (γ -TDPAD) method. Several devices which are indispensable for the experiment have already been developed. Also, a simulation study has been completed on the beam line for the production of the spin-oriented ^{134}Ce isomeric beam.

(2) Development of the next-generation multitracer technology and applied research

We have developed a multitracer technology in which radioactive nuclides are used together to simultaneously trace the behavior of many elements. This technology enables us not only to efficiently acquire data for various elements, but also to determine the characteristic behavior of different elements under identical experimental conditions. It is no exaggeration to say that multitracer technology is an epoch-making innovation in analytical chemistry.

The aim of this project is the development of the next generation in multitracer technology for an automatic chemical separator, new γ -ray detector (Multitracer γ -ray Emission Imaging: GREI) and a new multitracer production system.

(3) Cellular response to DNA double-strand breaks (DSBs)

We examined the response of DNA-PK to DSBs induced through radiation. Phosphorylation of XRCC4 by DNA-PK was observed following 0.1 to 1 h after X-ray or heavy ion irradiation. This XRCC4 phosphorylation was enhanced according to LETs. In addition, the phosphorylated DNA-PKs was localized along the heavy-ion tracks, suggesting that DNA-PK activation is triggered when it recognizes DSBs efficiently.

(4) The studies on bio cross-talk functions

Around 7,000 of the mutagenized Arabidopsis plants by Ne-beams irradiation were grown and the resultant M_2 seeds were harvested. For checking the M_2 library, we germinated about 2,000 lines and found 41 albino lines as well as 4 hy-class mutant lines.

We have developed a Virtual RLGS system (prototype) and applied genome analysis of Arabidopsis mutants. As the results, this system with a rough-mapping technique is very useful for rapid identification of mutated genes that have DNA methylation alternations. We tried to develop a variety of specific DNA markers of chrysanthemum induced by ion-beam using RAPD method. In addition, molecular markers of cabbage yellow disease resistance were also obtained by AFLP method and found out to be very useful for linkage analysis. Irradiation with a heavy-ion beam has become a new method for mutation breeding of ornamental plants and crops to produce new cultivars valuable in the market. The phenotypes related with sterility, variegation, and floral color were evaluated in the screening for new cultivars of garden flowers. This year we isolated mutants induced with heavy-ion irradiation in buckwheat, rice, wheat, turf grass, bell pepper, sweet potato, chrysanthemum and rose.