

ムファクトリーの建設を行う。

中間段リングサイクロトロンは、全体の製作が完了した。今後、セクター電磁石の磁場分布の精密測定を行う。超電導リングサイクロトロンは、セクター電磁石、RF共振器、入射・取り出し装置の詳細設計を引き続き行った。入射用超電導偏向電磁石はコイルの巻線を終え、ポール、ヨーク等の製作を行った。今後、全体の組立てを行う。また、RRC-IRC

間のビームトランスポート系の偏向電磁石・四極電磁石およびそれらの電源の製作を行った。

中間段リングサイクロトロン、超電導リングサイクロトロンおよび Big RIPS を収容する加速器棟の建設を開始した。面積約 70 × 70 m²、深さ約 20 m の穴掘り作業を完了し、最下階の床のコンクリート打ちを行ったところである。

重イオン科学総合研究

Heavy Ion Science

1. 超重元素および新不安定同位元素の研究

代表研究者 矢野安重(加速器基盤研究部)

(1) 超重元素および新不安定同位元素の研究

研究担当者：森本幸司、谷畑勇夫、須田利美、Korcheninikov A., Kanungo R.*¹, 山口貴之*², 武内 聡*³, 鹿取謙二*⁴(RIビーム科学研); 森田浩介, 加瀬昌之, 趙 宇亮*¹, 工藤久昭*¹(ビーム分配技術開発室); 米田 晃*⁴(RIビームファクトリー計画推進室); 吉田 敦(放射線研)

重イオン入射による核融合反応研究のための中心的実験装置である、気体充填型反跳分離機(GARIS)をリングサイクロトロンの照射室からリニアックの照射室へ移設した。RIビームファクトリー計画の必要性から、従来のリニアックのすぐ下流に荷電多化器(CSM)と呼ばれる線形加速器が新たに設置されたがこの加速器CSMから得られるビームの最高エネルギーは核融合反応を行わせるために都合の良いものとなった。また、リニアックからリングサイクロトロンに至る長いビーム輸送システムをスキップすることができたために、これまで得られていたものよりも格段と強いビーム強度を期待できる。さらに2001年からの数年間、この加速器(リニアック+CSM)を占有的に使うことができる。この機会を利用し、生成確率の極端に小さい超重元素の合成実験を系統的に行うことができると予想される。

現在検出器の調製、大強度ビームに耐えうる標的の開発等が進行中である。

ロシアのフレロフ研究所との共同研究を進めている。理研リングサイクロトロンで開発した大立体角のシリコンテレスコープをフレロフ研究所に持ち込み、⁶Heを用いた超重水素⁵Hを探索し、これを発見した。

存在する可能性がある硼素としてはもっとも中性子の多い、²¹Bの探索を行った。結果として、この原子核は束縛状態としては存在しないことが分かった。

*¹ 共同研究員, *² 基礎科学特別研究員, *³ ジュニア・リサーチ・アソシエイト, *⁴ バイオストローク研究協力員

(2) 不安定同位元素のトレーサーとしての利用

研究担当者：矢野安重(加速器基盤研究部); 谷田貝文夫, 榎本秀一, 蛭沼利江子*¹, 柳谷隆宏*², 玉野春南*³, 楊永峰*³, 川村昌寛*⁴, 天野良平*⁵, 葉袋佳孝*⁵, 遠藤和

豊*⁵, 鈴木弘行*⁵, 高橋嘉夫*⁵, 姫野誠一郎*⁵, 矢永誠人*⁵, 高橋正昭*⁵, 南 武志*⁵, 末木啓介*⁵, 篠原 厚*⁵, 横山明彦*⁵, 柴田貞夫*⁵, 鈴木和夫*⁵, 桜井 弘*⁵, 小椋康光*⁵, 松本謙一郎*⁵, 岡本洋一*⁵, 内田滋夫*⁵, 田上恵子*⁵, 安井裕之*⁵, 武田厚司*⁵, 山崎峰夫*⁵, 中西由季子*⁵, 稲毛寛子*⁵, 鍋倉智裕*⁵, 中西友子*⁵, 古川 純*⁶, 五十嵐香織*⁶, 塩原大和*⁶, 畚野 純*⁶, 中山明弘*⁶, 吉田昭三*⁶, 辻 孝枝*⁶, 金山洋介*⁶, 藪下裕子*⁶, 大山拓也*⁶, 前津仁美*⁶, 吉田 努*⁶, 笈田多加史*⁶(ラジオアイソトープ技術室); 中原弘道*⁵, 本村信治*⁶, 郷農靖之*⁷, 旭 耕一郎(応用原子核物理研); 山口 勇, 有江 力, 能勢泰寛*², 曾雌隆行*³(微生物制御研)

マルチトレーサーを用いた応用研究としては本年度も、生物学、医学領域が多い。代表的な成果を上げると、ラットにおける各種微量元素の胎盤透過性に関しては、胎生12, 14, 16, 18, 20日の各胎児、または出生後1日の新生児および胎盤の微量元素の蓄積性の違いを明らかにした。また、セレン欠乏状態にあるラットのヒ素蓄積性の亢進に関するメカニズムを解明する研究を推進した。さらに、脳腫瘍モデルラットにおける各種元素の腫瘍蓄積性を調べ、亜鉛およびマンガンの腫瘍蓄積性を明らかにし、脳腫瘍診断および治療に対する臨床応用の可能性を示唆した。また、マウス線維芽細胞由来のカドミウム耐性細胞(Cd-rB5)の有するカドミウムとマンガンの取込み系に関する研究では、アフリカツメガエル卵母細胞を利用して、輸送系のタンパク質の再構成の研究に着手した。ほかにも、バナジウム錯体化合物の糖尿病治療薬(血糖降下作用)の臨床応用を目指した基礎研究、新規放射性医薬品の創薬、遺伝子変異植物における微量元素の取り込み機構に関する研究などが推進された。

*¹ マルチトレーサー研究協力員, *² 基礎科学特別研究員, *³ 協力研究員, *⁴ 業務嘱託, *⁵ 共同研究員, *⁶ 研修生, *⁷ 客員主管研究員

(3) 不安定原子核をプローブとした凝縮系の研究

研究担当者：小林義男, 上野秀樹, 佐藤 涉*¹, 岡田卓也*², 久保謙哉*², 山田康洋*², 栄長泰明*², 小川博嗣*², 浅井吉蔵*², 那須三郎*², 勝又啓一*³, 宮崎 淳*³,

島崎秀生^{*3}, 堀 健太郎^{*3}, 村田昌樹^{*3}, 山田真実^{*3}, 藤田貴子^{*3}, 齋藤 崇^{*3}(応用原子核物理研); 八木栄一^{*2}(ミュオン科学研); 吉田 敦, 渡邊 康(放射線研); 石原正泰(理研 BNL 研究センター); 加瀬昌之(ビーム分配技術開発室); 後藤 彰(加速器技術開発室); 矢野安重(加速器基盤研究部); 吉田 豊^{*2}(原子物理研)

不安定核ビームを利用したインビーム・メスパウアー実験を進展させた。リングサイクロトロンと RIPS で生成・分離した短寿命不安定核 ^{57}Mn を Si 単結晶および過マンガン酸カリウムに直接イオン注入し, オンラインでメスパウアースペクトルの温度変化を測定し, 注入イオンの占有位置とその動的挙動や, 原子価状態に関する知見を得た。Si の注入実験では, 結晶格子間位置にある ^{57}Fe (^{57}Mn) 原子ジャンプ過程の温度依存性(30 ~ 800 K)について観測を行った。500 K 以上ではその格子間位置にある ^{57}Fe 原子は格子間位置を動きはじめることがスペクトルの線幅の広がりや面積強度の減少から明らかとなった。さらに, 700 K になると格子間位置と置換格子位置の平均した場所に相当する 1 つの幅広いピークとなり, 注入された ^{57}Fe 原子は, 格子間位置とポテンシャルエネルギーがより安定な置換格子位置とを行き来する「 motional averaging 」を観察することに成功した。700 K 以上での ^{57}Fe 原子の Si における平均占有確率は, 格子間位置に 30%, 置換格子位置に 70% であることが分かった。一方, 過マンガン酸カリウムを試料にした実験では, ^{57}Fe に壊変した後は通常固体中で安定な原子価状態 2+, 3+ より高い状態にあることが示された。この Fe 化学種について, Gaussian98, DV-X α 法, ADF による分子軌道計算を行い, 電子状態・原子価状態について議論した。

^{*1} 基礎科学特別研究員, ^{*2} 共同研究員, ^{*3} 研修生

2. 不安定核ビームを用いた核科学

代表研究者 谷畑勇夫(RI ビーム科学研)

研究担当者: 谷畑勇夫, Korshennikov A., 吉田光一, 小沢 顕, 須田利美, 森本幸司, 望月優子^{*1}, 日下健祐^{*1}, Golovlov M.^{*2}, 山口貴之^{*3}, 中務 孝^{*3}, 鹿取謙二^{*1}, 池田清美^{*1}, Kanungo R.^{*2}, 鈴木 健^{*2}, 熊谷秀和^{*4}(RI ビーム科学研)

高いエネルギーの重イオンを用いて不安定核を作り, これをさらに RI ビームとして, それを用いた反応により, 短寿命核の研究をする方法を開発し, その利用を進めている。これにより中性子ハローや, 中性子スキンなどを発見してきた。

本年度は, 酸素の同位元素の研究を発端として, 中性子数 16 のマジックナンバーが中性子過剰核に存在することを発見した。また, その他にも中性子過剰な原子核では, これまでにない新しいマジックナンバーが, 現れることを見いだした。この発見は原子核の基本構造を理解する上で非常に重要なものと考えている。

小さな相対角度で放出される 2 個の中性子を検出するためのアレキ検出器の制作を行い, ^{11}Li 核の融合反応から放出される中性子の測定を行った。データは今解析中である。

高分解能の時間測定検出器を開発していたが, 重イオンに対して, 20 ピコ秒という時間分解能を持つ検出器の開

発に成功した。これを用いて, ^{23}O の破砕反応で生成される ^{22}O の速度分布の測定に成功した。データは今解析中である。

理論グループでは, 原子核構造と R-過程で作られる元素存在率の関係の研究を行っている。

^{*1} 研究協力員, ^{*2} 共同研究員, ^{*3} 基礎科学特別研究員, ^{*4} 研究嘱託

3. 高エネルギー高電離重イオンによる原子物理の研究 代表研究者 山崎泰規(原子物理研)

(1) 高速重イオンのチャネリングによる crystal assisted X 線高分解能分光の開発と多価イオンの QED 効果

研究担当者: 中井陽一, 池田時浩, 神原 正, 東 俊行^{*1}, 小牧研一郎^{*1}, 伊藤高臣^{*1}, 高林雄一^{*2}, 山崎泰規(原子物理研)

高エネルギーの重イオンが結晶中をチャネリングすると結晶の周期電場による疑似光子により束縛電子が共鳴的に励起される。数百 MeV/u 程度の重イオンでは, 共鳴幅が 100 ppm 程度と非常に狭いことが分かった。これは数 keV から数 10 keV の多価イオンの X 線分光法としては, 分解能, 適応範囲の広さ等で出色のものになる。本年度は, さらに分解能を上げるための高精度ゴニオメータの設計製作, 単色高品質ビームラインの設計, 微弱イオンモニターの開発を行った。Ar を用いたテスト実験の準備を進めている。

(2) 低速不安定核ビームの生成と核磁気モーメントの測定

研究担当者: 和田道治, 中村貴志^{*2}, 片山一郎^{*1}, 岡田邦宏^{*1}, 中井陽一, 小島隆夫, 金井保之, 大山 等, 神原正, 山崎泰規, 川上宏金^{*1}, 大谷俊介^{*1}(原子物理研); 石田佳久^{*2}, 松尾由香利, 福山祥光^{*3}(RI ビーム科学研), 吉田 敦(放射線研); 久保敏幸, 野田耕司^{*1}(ビーム分配技術開発室)

高エネルギー重イオンビームと破砕核反応分離器によって得られる不安定核ビームは高エネルギー, 汎元素, 汎寿命という優れた特徴をもつ。一方イオントラップ実験などには低エネルギー高品質不安定核ビームが必要である。両者を結合する機構として, 高周波イオンガイド法の開発実験を行っている。高速イオンは, 前置減速フォイルで減速後, 大きなヘリウムガスセル中で停止される。その熱化イオンは, 高周波電場により収束されセル出口へ高速・高効率で導かれる。小型モデルによるオフライン試験により, 高周波の効果が確認できた。さらに理研加速器施設の破砕核反応分離器(RIPS)において, Li-8 ビームを用いたオンライン試験を開始した。

イオントラップに閉じ込められたイオンの基底準位の超微細構造の精密分光から, 原子核の磁化分布の同位体効果(Bohr-Weisskopf 効果) を導き出す研究を進めている。特にベリリウム同位体の測定から中性子ハロー核 Be-11 の価中性子の径が広がっている効果を直接測定することを目指している。そのための測定技術開発の結果, 安定同位体 Be-9 の超微細構造定数, 核磁気モーメントをそれぞれ 10^{-8} , 10^{-9} の高精度で決定することができるようになった。また, 外部から入射されたイオンの高効率蓄積に不可欠なバッファガス冷却が Be イオンにおいてもクライオジェニックトラップを用いることで可能なことが示された。

(3) 高速重イオンによる動的照射効果の研究

研究担当者：神原 正，蔭山健介^{*1}，金井保之，小島隆夫，中井陽一，岩瀬彰宏^{*1}，石川法人^{*1}，知見康弘^{*1}，黒田直志^{*1}，小野文久^{*1}，池田 博^{*1}，山崎泰規（原子物理研）

高速重イオンによる動的照射効果を観測するために，前年度に引き続いて重イオン照射による超音波領域の弾性波の発生を観測した。阻止能の大きさの異なるイオンを比較するために，リングサイクロトロンからの 3.5 GeV の Xe イオンおよび 3.8 GeV の Ar イオンを時間幅 3 ナノ秒以下のパルスにして各種固体試料に照射し，試料に取り付けた圧電素子で弾性波を観測した。Xe イオンでアルミニウムと銅を照射してビームの進行方向に圧電素子を置いた場合，100 ナノ秒以下の立ちあがりの早いパルス状縦波を観測した。これに対して Ar イオン照射でアルミニウム・銅・酸化アルミニウムの多結晶，塩化カリウム・フッ化リチウムの単結晶，溶融シリカ，インバー合金を照射したときには，もっと遅い縦波を観測した。弾性波の立ち上がりとビーム照射の時間差，試料の大きさおよびバルクの音速から，弾性波の発生源を推定したが，これは計算から求めた試料中のイオン飛程とよく一致した。また弾性波の振幅は試料の熱膨張率とおおむね対応することが判明したが，それと大きく外れる場合も見られる。

また恒久的な照射損傷の生成過程とその物性に及ぼす影響を見るために，Bi-2212 酸化物超伝導体単結晶に，リングサイクロトロンによる Kr，Xe，Ta，Bi のイオンで照射し，照射によって生じた欠陥の構造を電子顕微鏡で観察するとともに，交流帯磁率で超伝導特性を測定した。いずれのイオン照射でもイオンパスに沿った非晶質領域が生じている。その直径の平均値は，照射イオンの電子的阻止能の増加と共に増加する。その直径のばらつきは，Ta，Bi に比べて，Xe，Kr の方がはるかに大きいことが判明した。

さらに高速重イオン照射による磁性体の改質を試みた。Fe-Ni インバー合金を 3.5 GeV の Xe イオンおよび 3.8 GeV の Ta イオンで室温照射した後，格子定数，自発磁化，キュリー温度の照射による変化を測定した。いずれのイオンを照射した場合も，キュリー温度は上昇し，格子定数は増加した。これは，インバー合金を高圧下で測定したときの变化と反対である。しかも，照射量が $10^{12}/\text{cm}^2$ と少ないにもかかわらず大きな変化が観測される。これらの実験結果は，GeV イオンによる高密度電子励起が飛跡に沿った領域の格子を膨張させ，その領域でのキュリー温度が上昇したためであることを示唆する。これは GeV イオン照射が，磁性体を局所的に改質できることを示す興味ある結果である。

(4) 標的 Li 原子トラップの開発

研究担当者：金井保之，山崎泰規（原子物理研）

冷却標的的反跳イオン運動量分光法（COLTRIMS）を複数の殻を持つ標的に適用し，衝突基礎過程を研究するため，リチウム原子の磁気光トラップの開発を開始した。冷却されたリチウム原子を標的とし（i）異なる主量子数の軌道に属する 2 電子の移行反応の研究（ii）3 電子移行の研究（iii）最外殻電子の 2s 電子を 2p 状態に励起した場合の 1 電子移行反応の研究を，COLTRIMS の特徴（高い検出効率，最終状態識別）をいかして行う。

このため，カンザス州立大学（KSU）と共同研究を進め，反跳イオン測定装置と MOT 標的と組み合わせる方法，ビームのコリメーションの方法など，技術的問題を検討した。

(5) 高速イオンによる C₆₀ 分子の電離と解離

研究担当者：中井陽一，神原 正，伊藤秋男^{*1}，土田秀次^{*1}，山崎泰規（原子物理研）

飛行時間質量分析法を用いた高速イオンによる C₆₀ 分子の電離および解離性イオン化の測定結果の解析を行った。フラレン状と思われる重い解離イオンの生成機構を研究するため，1+，2+の重い解離イオンに対して統計的な単分子解離の理論に基づくシミュレーションを行い，実験で得られた飛行時間スペクトルと比較した。シミュレーション結果はおおむね実験結果を再現している。

(6) イオン励起 X 線分光（PIXE）分析

研究担当者：前田邦子，長谷川賢一^{*1}（ラジオアイソトープ技術室）；吉識 肇（安全管理室）

真空外で，微量試料や局所部分の化学結合状態を非破壊的に分析できる波長分散式の PIXE 法を開発している。新開発の積層型位置敏感比例計数管を用いた高感度高分解能 PIXE システムに，時間分割測定の機能を組み込んだ。短時間（数秒-数分）での迅速分析が繰り返し連続的に行えるので，化学状態の時間変化を追跡することができる。海底堆積物など環境試料中の硫黄の状態分析への応用を試みた。

半導体検出器を用いたエネルギー分散式 PIXE 分光による多元素同時微量分析を，様々な分野の試料を対象として継続的に行っている。本年度は，土器，エロゾル等の分析に応用した。また，多元素同時分析において半導体検出器を補完することを目的として，手乗りサイズの小型結晶分光器を製作した。

^{*1} 共同研究員，^{*2} 協力研究員，^{*3} 基礎科学特別研究員

4. 重イオンによる生物効果の研究

代表研究者 花岡文雄（細胞生理学研）

研究担当者：谷田貝文夫，水野 武，金井達明^{*1}，安藤興一^{*1}，古澤佳也^{*1}，笠井清美^{*1}，伊東久夫^{*1}，山下昌次^{*1}，渡邊正己^{*1}（細胞生理学研）；吉田茂男，阿部知子（植物機能研）；前澤 博^{*1}，森本茂子^{*2}，Alasdair G.^{*3}（ラジオアイソトープ技術室）；矢野安重（加速器基盤研究部）；加瀬昌之（ビーム分配技術開発室）；福西暢夫（加速器技術開発室）；日下部守昭（遺伝子基盤研究部）

加速重イオン粒子の生物作用を明らかにすることを目的に，DNA 損傷とその修復，突然変異誘発，染色体異常，組織レベルでの障害などに関して一連の基礎的研究を進めるとともに，宇宙放射線影響のモデル実験，有用な植物変異株の分離，さらには重イオンによるがん治療のための基礎的知見の集積などの応用的研究も同時に行っている。ここでは，紙面の都合上，ヒトリンパ芽球様細胞を利用して明らかにした「重イオンに特有と考えられる」生物効果について述べる。

重イオン照射後の細胞応答を調べるため，照射直前に S 期に存在する細胞のその後の動態を BrdU によるプレラベルを用いて解析したところ，鉄イオン照射は炭素イオン照射などに比べて細胞を長期間 S 期に停留させ，G₂ 期への進行を遅らせるという結果が得られた。この結果は従来の細

胞周期分布の照射後の推移ともつじつまがあい、重イオンに特有な DNA 損傷の生成を強く示唆している。また、個々の細胞における照射後の細胞応答を明らかにするために、がん抑制遺伝子 p53 タンパクの誘導を間接蛍光抗体染色で

測定したところ、その誘導は重イオンが細胞をヒットする確立に比例して増加することが明らかになった。

*¹ 共同研究員, *² 技術研究生, *³ 訪問研究員

バイオクロストーク機能研究 Study on Biological Crosstalk Functions

代表研究者 吉田茂男
(植物機能研究室)

ライフサイエンス分野の最先端技術である発生工学等と精密制御が可能な高エネルギー重イオンビームを組み合わせると、微生物から高等動植物に至る広範囲の生命現象を操作できる新しい手法を開発できる。また、このような手法は核・ミトコンドリア・葉緑体など細胞内諸器官間のクロストークや細胞集団間のクロストークを解明する画期的なアプローチを提供する。この生命現象全般にかかわるバイオクロストーク機能研究を遂行するためには、重イオン加速器からのマイクロビームが第一に必要である。そこで重イオン加速器科学の蓄積を生かして、マイクロビームの要素技術を開発すると同時に、動植物の組織・器官・ゲノム等を高エネルギー重イオンビームにより操作するための基盤技術を確立する。

1. マイクロビーム大気中照射装置高度化研究

研究担当者: 福西暢尚(加速器技術開発室); 米田 晃^{*1}, 込山美咲^{*2}, 加瀬昌之(ビーム分配技術開発室); 矢野安重(RI ビームファクトリー計画推進室)

本年度は理研リングサイクロトロンで発生した重イオンビームを、バイオクロストーク研究を初めとする生物学研究の実験に供給するとともに、大気中照射装置の高度化に取り組んだ。加速器研究施設の E5 実験室に設置されている大気中照射装置は、使用可能なイオン種が制限されており、また線エネルギー付与を調整するレンジシフターの存在が照射領域におけるビーム強度の均一度を低下させるといった問題がある。イオン種によらず線エネルギー付与を調

整するにはバイナリータイプのレンジシフターが適している。また厚いレンジシフター使用時のビーム強度の均一度の向上には、現状のウォブラー電磁石と散乱体を組み合わせた方法に代わってビームスキャナーの導入が必要となる。これらの観点から現状の大気中照射装置に代わる新たな大気中照射装置の設計を行った。

*¹ 研究協力員, *² 技術研究生

2. 植物バイオクロストーク研究

研究担当者: 吉田茂男, 阿部知子, 松山知樹(植物機能研)
栽培タバコの受精胚細胞やイネ・大麦の種子に重イオンビームを照射し、得られた系統の M₂ 世代にバイオクロストーク機能解明に適した変異株である葉緑体欠損株(アルピノ株・斑入り株)が分離する系統が出現した。これらのアルピノ変異株を用いて核-葉緑体間のクロストーク研究を行うとともに、変異遺伝子の解析を RLGS (Restriction Landmark Genomic Scanning) 法で試みたところ、多型スポットが確認された。本年度は、スポットの同定をさらに効率良く行うために 2000 年 12 月に全ゲノム塩基配列が報告されたシロイヌナズナをモデル植物としてシミュレーションプロファイルの作成を行った。その結果、実験パターンとシミュレーションパターンの比較から 85% のスポットの同定がなされ、従来のクローニング法に比べ、飛躍的な作業工程の省力化が実現した。