

解 説

イオン蓄積・冷却リング S-LSR の開発と現状

野田 章^{*1}・白井 敏之^{*2}

Development and Present Status of Ion Storage/Cooler Ring, S-LSR

Akira NODA^{*1} and Toshiyuki SHIRAI^{*2}

Abstract

An ion storage and cooler ring, S-LSR has been constructed at Institute for Chemical Research, Kyoto University. Its circumference is 22.57 m and it can accumulate and cool the beams of 7 MeV proton, 40 keV $^{24}\text{Mg}^+$ and 2 MeV/u $^{12}\text{C}^{6+}$ ions. Electron cooling of hot ions by sweeping the relative velocity between the electron and ion beams has been experimentally demonstrated and the cooling time has been almost one order of magnitude reduced with such a scheme. Lowest temperature limit of electron cooled 7 MeV protons has also been studied reducing the particle number. Sudden jump of momentum spread corresponding to one dimensional phase transition to the ordered state has been observed at ~ 2000 particles for the first time for proton beam. One dimensional laser cooling of $^{24}\text{Mg}^+$ has also been realized with and without application of induction acceleration. Creation of three dimensional crystal beam is our next goal with the use of three dimensional laser cooling taking the suppression of shear into account.

1. はじめに

京都大学・化学研究所の附属原子核研究施設（現附属先端ビームナノ科学センター）では、既設の陽子線形加速器及び電子線形加速器と電子蓄積リング（KSR）を用いた研究・教育を進めるのと並行して、近年その有効性が広く知られるにいたってきた粒子線によるがん治療のより広範な普及に、加速器サイドから資するべく研究・開発を続けてきたが^{1,2)}、科学技術庁（現文部科学省）、科学政策研究所の加速器からのビームのニーズに関する調査結果に基づき、平成13年度からスタートした先進小型加速器のための要素技術の開発事業において、放射線医学総合研究所、日本原子力研究所・関西研究所（現日本原子力研究開発機構・関西光科学研究所）、高エネルギー加速器研究機構等との共同研究により、レーザー生成イオンビームをがん治療専用パルス高磁場シンクロトロンの入射ビームに用いることにより、こうしたがん治療専用加速器施設の抜本的な小型化を図る可能性を追求してきた。図1にこのシナリオで目指すがん治療専用の小型加速器の全体構成を示す。京大・化研はレーザー生成イオンをレーザーと位相同期した高周波電場で縦方

向位相空間において回転（位相回転）し、レーザー生成イオンの運動量幅を1桁近く縮減した後、最終段のパルス高磁場シンクロトロンとのマッチングを実現するため、ホットイオンの電子ビーム冷却を行うスキームを実証する役割を担ってきた³⁾。レーザー生成イオンの位相回転による特性改善は別として⁴⁾、ここでは最近成果をおさめた陽子ビームの電子ビーム冷却を中心にイオン蓄積・冷却リング S-LSR に関してその開発の概要と最近の成果について紹介したい。

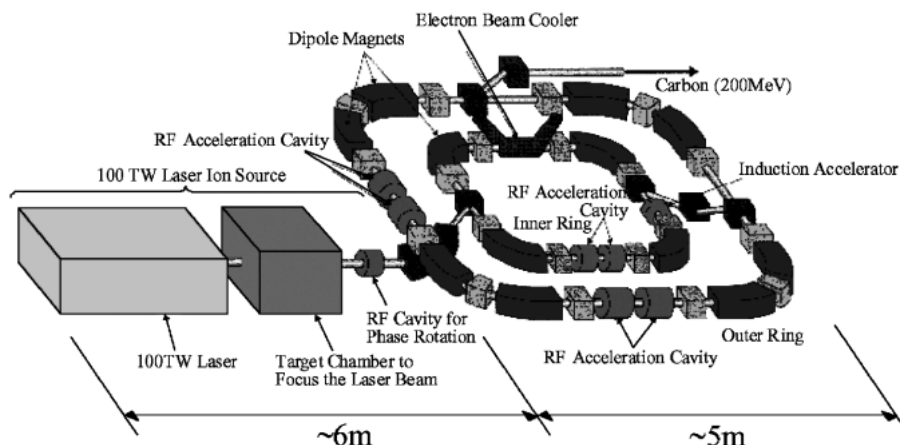
2. イオン蓄積・冷却リング S-LSR

イオン蓄積・冷却リング S-LSR は図2に示したように京都大学宇治キャンパスの化学研究所のイオン線形加速器実験棟に設置されている。入射ビームとして既設の陽子線形加速器からの7 MeV 陽子ビームと40 keV でイオン源から引き出した $^{24}\text{Mg}^+$ のビームを直接輸送したものを使用しているが、隣接する10 TWの高強度パルスレーザー T6 レーザーを実験室内に導き、2 MeV/u の炭素イオン生成を行い、位相回転の後 S-LSR に入射・蓄積し、電子ビーム冷却を適用する総合試験も近い将来に予定している⁵⁾。

S-LSR は図からも見て取れるように比較的限られ

^{*1} 京都大学化学研究所 Institute for Chemical Research, Kyoto University
(E-mail: noda@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp)

^{*2} 京都大学化学研究所 Institute for Chemical Research, Kyoto University
(E-mail: shirai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp)



Compact Heavy-Ion (Carbon Ion) Synchrotron

図 1 先進小型加速器計画においてレーザー生成イオンを用いて小型化を目指すがん治療専用加速器。

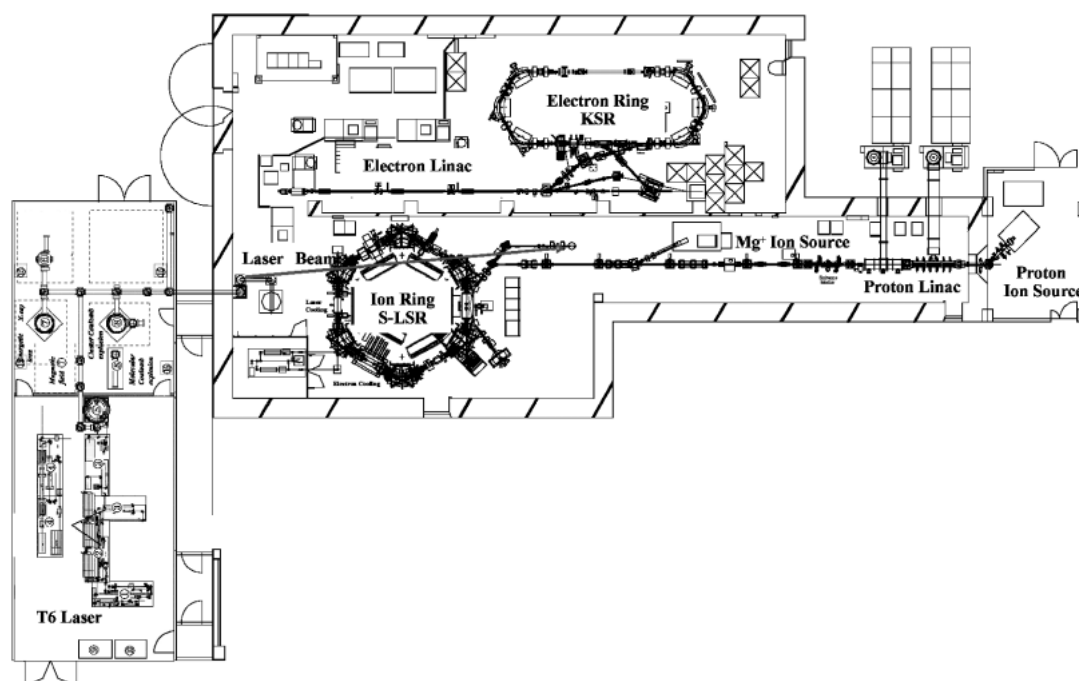


図 2 京大・化研の加速器施設における S-LSR のレイアウト

たスペースに設置されているが、後述するビームダイナミクスの要求からリングの対称性は 6 と高く設定されているので、ビームの入・出射や RF 加速、電子ビーム冷却に使用する長直線部の長さを可能な限り短く抑える必要があり、電子ビーム冷却装置では、トロイドの曲率半径を従来と比して極めて短い 0.25 m で設計を行う等の種々の工夫が凝らされている⁶⁾。表 1 にイオン蓄積・冷却リング S-LSR の主要パラメータを示しておく。

表 1 S-LSR の主要パラメータ

周長	22.557 m
平均半径	3.59 m
超対称性	6
イオン種	陽子 : 7 MeV $^{24}\text{Mg}^{+}$: 40 keV $^{12}\text{C}^{6+}$: 2 MeV/u
動作点	(1.65, 1.21): Electron Cooling (1.45, 1.44), (2.07, 1.07): Laser Cooling
曲率半径	1.05 m
最大磁場	0.95 T

3. 電子ビーム冷却

電子ビーム冷却は、よく知られているように、反陽子冷却をおこなうために、G. Budker によって 1960 年代に提案された⁷⁾。その原理は、気体の分子運動論からの類推で考えるとわかりやすい。荷電粒子ビームは、一成分プラズマであり、粒子の静止系での運動は、磁気レンズという箱に閉じ込められた気体の運動になぞらえることができる。この描像では、ビーム温度 T は、静止系で見た粒子速度 v の二乗平均で定義され、

$$\frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle, \quad (1)$$

与えられる。ここで、 k_B はボルツマン定数、 m は粒子の質量である。電子ビーム冷却は、2 つのビームを同じ速度で一定区間並走させることで、低温気体である電子ビームと、高温気体であるイオンビームを混合させて、クーロン相互作用を通して熱交換をおこない、イオンビームを冷却するものである。このアイデアは、ノボシビルスク INP の NAP-M で実験的に実証された。その後、残念ながら反陽子冷却の成功は、確率冷却に譲ったが、電子ビーム冷却装置は、多くのイオン蓄積リングに設置され、重イオンビームの冷却や、確率冷却による pre-Cooling の後の冷却などに広く利用されている。国内でも TARN-II⁸⁾、HIMAC⁹⁾、ESRING¹⁰⁾ において建設・利用されている。また、最近では、高エネルギーイオンビームの電子ビーム冷却が、積極的に検討されており、Fermilab において、8 GeV 反陽子の電子ビーム冷却に成功している¹¹⁾。

イオン蓄積リング S-LSR では、後に述べるレーザー冷却と共に、電子ビーム冷却装置を設置し、冷却

ビームの応用と、ビーム物理の研究をおこなっている。S-LSR の電子ビーム冷却装置の写真を図 3 に、主要なパラメータを表 2 に示す。これは、当時大学院生だったファジル ヒシャム君が中心になって設計をおこない⁶⁾（彼はこの成果も含む業績で第 2 回加速器学会賞奨励賞を受賞した）、㈱東芝で製作された。

電子ビーム冷却のコミッショニングは、2005 年 10 月後半から始まり、2005 年 10 月 31 日に、はじめて 7 MeV 陽子の電子ビーム冷却に成功した。図 4 は、その際に得られたビームプロファイルである。運動量広がりと水平方向プロファイルを、それぞれショットキーノイズスペクトラムと残留ガスイオン化モニターで測定している。イオンビーム電流は $50 \mu\text{A}$ （蓄積粒子数 2×10^8 個）、電子ビーム電流は 60 mA である。ビーム冷却によって、運動量広がりには 2×10^{-4} に、ビームサイズは 1.2 mm まで小さくなっている。

その後のコミッショニングや、ハードウェアの改良などを経て、現在はさまざまな実験に用いられている。ここでは、電子ビーム冷却を用いておこなわれたビーム物理の実験について紹介する。

3.1 ホットイオンビームの冷却

はじめに述べたように、レーザーによって加速され

表 2 電子ビーム冷却装置の主なパラメータ

Electron energy	5.0 keV (Max.) 3.8 keV (for 7 MeV p ⁺)
Electron current	25 mA–300 mA
Electron beam diameter	50 mm
Solenoid Field	500 Gauss
Adiabatic expansion factor	3
Cooler solenoid length	800 mm
Effective cooler length	440 mm

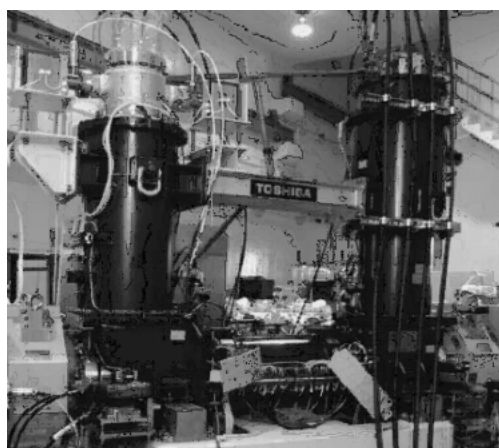


図 3 S-LSR に設置された電子ビーム冷却装置

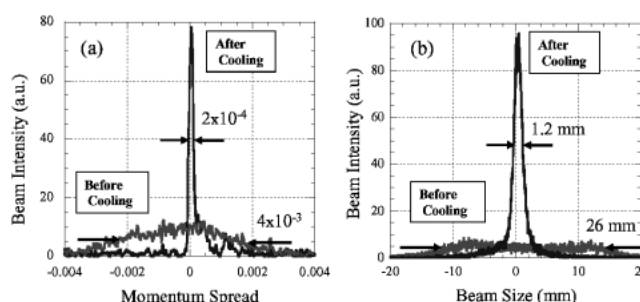


図 4 電子ビーム冷却前後での運動量広がり (a) と水平方向ビームプロファイル (b)。それぞれ、ショットキーノイズスペクトラムと残留ガスイオン化モニターで測定した。

たエネルギー広がり大きなイオンビーム（ホットビーム）をいかに速く冷却するかは、S-LSR の電子ビーム冷却にとって重要なテーマである。一般に確率冷却は、ホットビームの冷却に向いていると言われるが、反陽子のような少ない粒子数ならともかく、粒子数が多くなると、冷却時間は長くなってしまふ。一方、電子ビーム冷却は、その冷却力がイオンと電子の相対速度 v_r が小さい領域で大きく、それ以外では、 $1/v_r^2$ に比例して小さくなるという特性をもつため、運動量広がり大きいビームに対しては、冷却時間が長いことが知られている。

そこで、我々は電子ビーム冷却の冷却力が大きい領域を速度空間で Sweep することで、冷却に要する時間を短縮する Sweep Cooling を提案した³⁾。これには、2つの手法がある。一つは、電子ビーム冷却のパラメータを固定しておき、イオンビームの中心速度を誘導加速器で掃引することで、冷却力の向上を図るものである。もうひとつは、イオンビームの中心エネルギーを固定しておき、電子ビーム冷却の電子速度を掃引することで、イオンビームを効率的に冷却するものである。両者は、物理的に等価であり、ビームパラメータなど状況に合わせて使い分けることができる。

図5は、このうちの前者の原理を模式的に説明している。冷却力の小さい領域にあるイオンビームは、誘導加速によって、冷却力が強い領域まで加速され、冷却中心にトラップされる。我々は、MPI-K の TSR において、この原理検証実験を、 C^{6+} ビームを用いておこない、冷却時間の短縮を確認した¹²⁾。S-LSR においては、陽子ビームをもちいて、実験をおこなった。

図5から容易にわかるように、誘導加速電圧 V_{ind} と、冷却力 F_c は次のような関係を満たさなければ、イオンビームは、もはや冷却ポテンシャルにトラップされなくなる。

$$ZeV_{ind} < F_c L_{eff} \quad (2)$$

ここで、 Ze はイオンの電荷、 L_{eff} は電子ビーム冷却装置の有効長である。この電子ビーム冷却力は、電子ビーム電流（電子密度）によって決まるが、イオンのビームサイズにも依存する。

S-LSR で測定したところ、7 MeV 陽子ビームで、電子電流 100 mA、陽子ビーム径 17 mm (2σ) の場合、最大誘導加速電圧は 5.5 mV であった。このときの、誘導加速の有無による冷却の様子の違いを図6に示す¹³⁾。この誘導加速の適用により、ビームサイズの冷却時間は、35 秒から 12 秒へと短縮された。同時に運動量広がりについても、冷却時間は 30 秒から 10

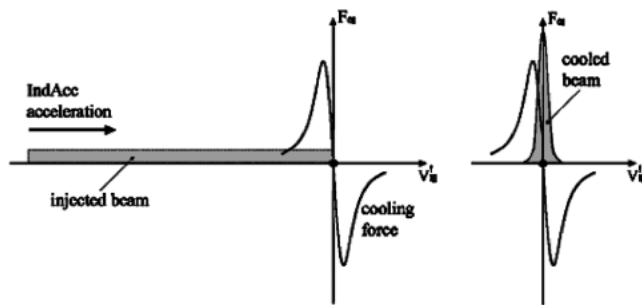


図5 誘導加速器をもちいた Sweep Cooling の原理の模式図。

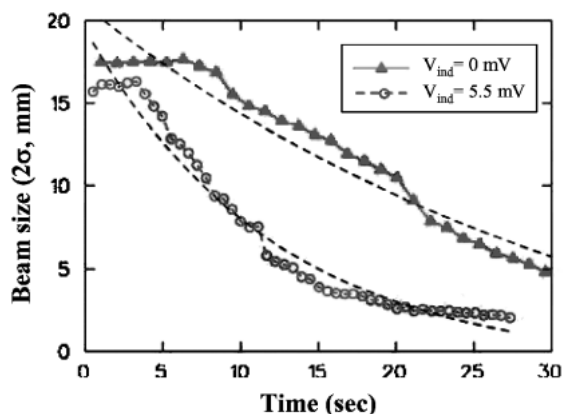


図6 5.5 mV の誘導加速電圧を印加した時と、印加しない時の、電子ビーム冷却中のビームサイズの時間変化。電子電流は 100 mA。

秒へと短縮された。これから、両方向共に 3 倍程度の冷却時間の向上が得られることがわかる。

レーザー加速ビームは、レーザーが非常に狭い領域に集光されて、その点から発生するので、小さいエミッタンスをもつことが期待されている。運動量広がり大きくとも、初期ビームサイズが小さいビームに対しては、誘導加速電圧を高くできるため、この手法は非常に効果的になる。それを検証するために、陽子ビームを pre-Cooling して、陽子ビーム径を 2 mm (2σ) にした場合に、1 % の運動量広がりに対する冷却時間を測定した。図7に運動量冷却のようすを示している¹³⁾。このときの誘導加速電圧は、30 mV である。この場合、冷却は非常に速く進み、2.5 秒で冷却が終了する。これは、10 倍以上の冷却時間の短縮になっている。

ホットビームをいかに速く電子ビーム冷却するかは、G. Budker らが反陽子冷却を目指していた時代からの、電子ビーム冷却の課題である。我々は、冷却速度がビームサイズに依存するという課題はあるにせよ、

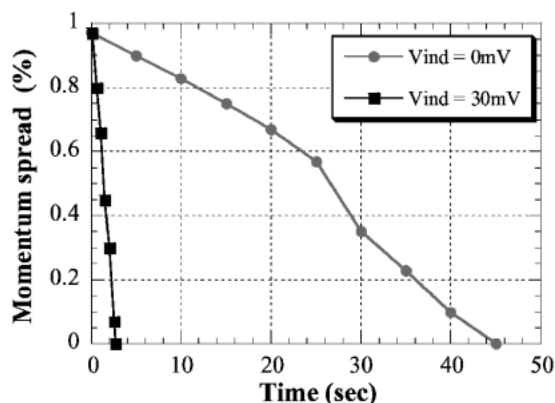


図7 ビームサイズを2 mm まで pre-Cooling したときの、運動量冷却のようす．誘導加速電圧は30 mV で、電子電流は100 mA.

Sweep Cooling という手法を提案して、このテーマに挑戦している．将来的には、この手法が、レーザー加速イオンだけでなく、2次粒子など他のホットビーム冷却に使える可能性もある．

3.2 極低温ビームへのアプローチ

前節の話題は、高温ビームの冷却であったが、逆に低温ビームの限界に関する研究も、S-LSR でおこなわれている．電子ビーム冷却をおこなった場合、図4のようなビームサイズ・運動量広がり、冷却レートと Intrabeam Scattering (IBS) によるビームの拡散レートの釣り合いによって決まる．しかし、INP の NAP-M と GSI の ESR において、通常のビーム冷却と IBS の釣り合いでは説明が出来ない現象が発見された．

前者は、陽子ビームを電子ビーム冷却して、粒子数を下げていったところ、 10^7 個の陽子を蓄積した状態で、運動量広がり、 10^{-6} (ビーム温度換算で1 K) になり、かつ 10^7 個以下では粒子数を下げても、運動量広がりは一一定であった¹⁴⁾．一方、後者では多価の重イオンビーム (Au^{79+}) を電子ビーム冷却し、同様に粒子数を減らしたところ、粒子数が数千個になったところで、突然運動量広がりが不連続に減少する現象が発見された¹⁵⁾．後者については、MSL の CRYRING でも、多価の重イオンビームをもちいて追試に成功している¹⁶⁾．後者の結果に関しては、GSI の R. W. Hasse が、粒子が十分に冷えたために、互いのクーロン障壁を越えられなくなって、ビーム進行方向に追越しができなくなり、IBS レートが低下したために、運動量広がりが急落したとの解釈を提案した¹⁷⁾．これは、ビームの IBS の様相が変化したということであり、一種のビーム相転移といえる．現在で

はこの現象は、“one-dimensional beam ordering” とも呼ばれている．しかし、陽子に関しては、COSY などで追試もおこなわれてきたが¹⁸⁾、これまでに不連続的な運動量広がり減少は、観測されておらず、また NAP-M で見られるように、なぜ陽子ビームが重イオンと異なった特徴を示すのかは、これまで不明であった．

我々は、S-LSR において陽子ビームを冷却しながら、徐々に粒子数を減らしていき、ビーム温度を下げていながら、ビームパラメータの精密測定をおこなった．測定量は、運動量広がり、ビームサイズであり、次のような関係式により、進行方向ビーム温度と横方向ビーム温度を推定した．

$$k_B T_{\parallel} = m_i c^2 \beta^2 \left(\frac{\delta p}{p} \right)^2, \quad (3)$$

$$k_B T_{\perp} \cong \frac{1}{2} m_i c^2 \beta^2 \gamma^2 \left(\frac{v_x + v_y}{R} \varepsilon \right), \quad (4)$$

ここで、 βc は粒子速度、 γ はローレンツ因子、 v_x, v_y は水平、鉛直方向チューン、 R は平均リング半径、 ε はエミッタンスである．運動量広がり、ビームサイズは、それぞれショットキーノイズスペクトラムとビームスクレーパーによって測定をおこなった．また、粒子数は残留ガスイオン化モニターのカウント数から推定した．ESR の結果から推定すると、それぞれ数千個の蓄積陽子に対して計測をおこなう必要があり、モニター感度の向上と共に、極限的なノイズの削減が求められた．

粒子数と運動量広がり並びにショットキーノイズパワーの相関の測定結果を図8に示す¹⁹⁾．粒子数 N が多い場合は、運動量広がり $N^{0.29}$ に比例するが、粒子数を2000個程度まで減少させた時に、運動量広がり急激な減少が観測された．この不連続な運動量広がり変化は、多価の重イオンの場合と同様に、相転移によるものと考えられ、陽子ビームにおいては、世界で初めての観測である．相転移点での運動量広がりから、7 MeV 陽子のビーム進行方向の相転移温度は、0.17 meV (2 K) と推定される．

図8(下)では、蓄積陽子数が数千個の点で、ショットキーノイズパワーにも異常が見られている．ordering により粒子運動がもはやランダムでなくなったことにより、ショットキーノイズに変化が生じたためと思われる¹⁶⁾．

図8(上)において、粒子数が1000個から2000個のときには、その運動量広がり、ばらつきは見られるが、粒子数には依存していない．この領域での平均

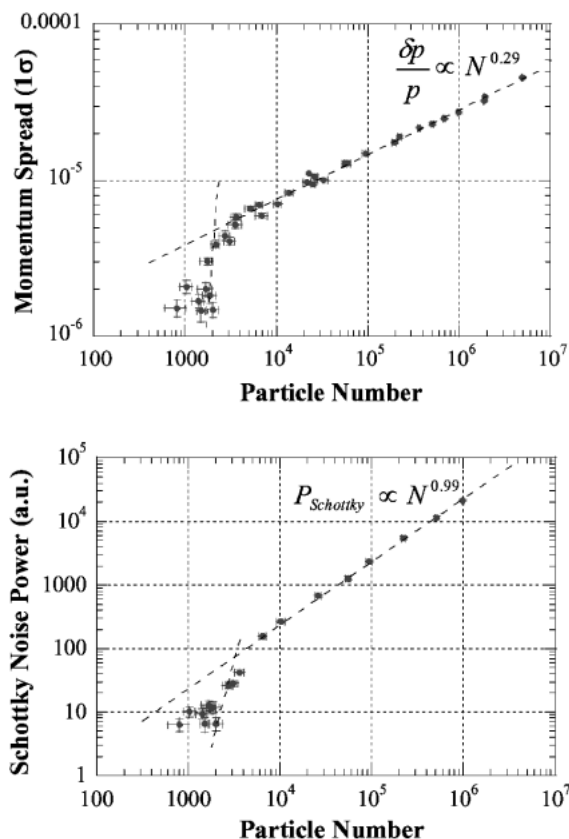


図8 蓄積陽子数と運動量拡がり（上）およびショットキーノイズパワー（下）の相関（文献19より転載）。このときの電子電流は25 mAである。運動量拡がり、運動量分布をガウス関数でフィッティングして、その 1σ 値で定義している。

運動量拡がりから、進行方向のビーム温度を計算すると、 $26 \mu\text{eV}$ (0.3 K) となる。この値は、冷却に用いられる電子ビームの進行方向温度の推定値 ($20 \mu\text{eV}$) に近い値となっている。つまり、orderingによりIBSが抑制されたことによって、理論的な冷却限界である電子温度近くまで、イオンビームは冷却されていると考えられる。

次にビームサイズと蓄積粒子数の関係を図9に示す¹⁹⁾。これから、ビームサイズは $N^{0.28}$ に比例することがわかる。しかし、測定の分解能不足により、運動量拡がりに相転移が見られた2000~3000個付近で、同様の不連続点が存在するかどうかについては、このデータからは何も言えない。しかし、この点でのビームサイズから横方向温度を計算すると、面白いことがわかる。この横方向のイオンビーム温度は1 meVに相当するが、横方向の電子温度は、断熱膨張による温度低下を考慮に入れても34 meVである。つまり、イオンは冷やしている電子の温度よりも1桁以上冷えている。これは、冷却装置内部のソレノイド磁場に、

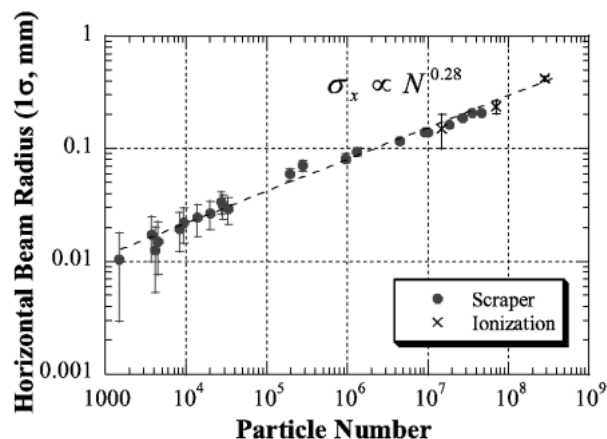


図9 蓄積陽子数とrmsビーム半径の相関（文献18より転載）。このときの電子電流は25 mAである。ほとんどのデータはスクレーパーによって測定されたが（●印）、クロスチェックのために、ビーム半径の大きい時には、残留ガスイオン化モニターでビーム半径を測定している（×印）。

電子が巻き着いて、電子の横方向運動が凍りついている効果 (Magnetized Electron) が直接見えていると考えられる²⁰⁾。

我々の研究によって多価の重イオンビームと同様に、クーロン相互作用の弱い陽子ビームも十分にビーム温度が下がれば、“one-dimensional beam ordering”の相転移をおこすことがわかり、これがイオンビームに普遍的な現象であることが明らかになった。ただ、NAP-Mで観測された陽子ビームのオーダリング現象 (10^7 個の陽子に対して $\Delta p/p = 10^{-6}$ の運動量幅が実現しているが運動量幅のジャンプは見受けられない) に対する説明はいまだになされていない。これは、ビーム冷却コミュニティにとっての今後の課題といえる。

3.3 電子ビーム冷却を用いたその他のアプローチ

電子ビーム冷却を用いたビームスタッキングにより蓄積陽子ビームの増大が可能となり、最大蓄積電流を $600 \mu\text{A}$ まで増加させることが可能となるが、その過程でビームのコヒーレント不安定性が生じることが観測された。位置モニターとして使用している静電モニターの電極を用いた負帰還をかける Feedback Dampingによりこの不安定性を抑制する試みが行われ、アナログ、デジタル両方式のfeedbackにより不安定性を抑制して蓄積電流をそれぞれ $800 \mu\text{A}$, $1200 \mu\text{A}$ まで増大させることに成功している^{21,22)}。

電子ビーム冷却した7 MeV 陽子ビームに RF 電圧

を印加してシンクロトロン振動させ、その1/4周期の近辺でパルス幅が最短になったところで早い取出しによりリングから取り出してフリーラジカル研究のためのパルスラジオリシスに使用する試みが開始され、 5×10^7 個の陽子に対して2.4 nsのパルス幅が達成されている²³⁾。これに関しては、これを中心的に推進されたAECの渋谷、藤本両氏が発表を予定しているので詳細はそれに譲り、上記の結果を記すにとどめたい。

4. レーザー冷却

4.1 1次元レーザー冷却

S-LSRでは図10に示したように上述の7 MeV陽子に対する電子ビーム冷却と並行して、40 keVの $^{24}\text{Mg}^+$ イオンのレーザー冷却を遂行している。図11にレーザー冷却の原理の概略を図示した。レーザー光の波長がドップラーシフトを考慮して図のMg



図10 S-LSRと電子ビーム冷却装置及びレーザー冷却部とレーザー冷却の調整の様子

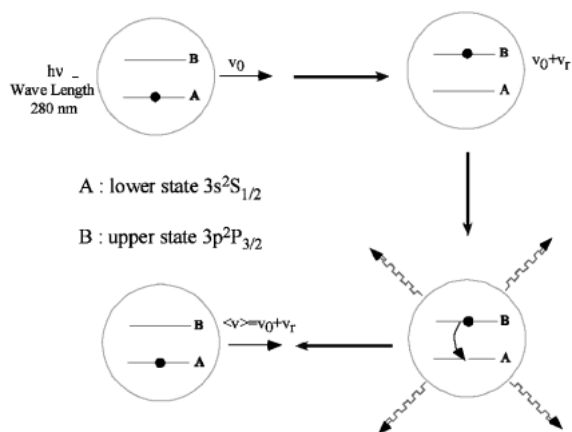


図11 レーザー冷却の原理

の upper level と lower level のエネルギー準位の差に等しくなる条件で光子がMgに吸収される。その際、レーザー光が後追いの状況でイオンに照射されている場合は、 $h\nu$ (ν は光の周波数、 h はプランク定数)だけ加速され、レーザーとイオンが正面衝突する場合には $h\nu$ だけの減速を受けることとなる。upper level から lower level への遷移に伴う光子放出は等方的であるので統計的にはこのプロセスでのMgへのエネルギーの授受は無い。

イオン源からのビームを40 kVの高圧で引き出した $^{24}\text{Mg}^+$ イオンビームを直接S-LSRに入射し、波長280 nmのレーザー光を用いてレーザー冷却を試みている。図10に示した直線部において色素レーザーを周囲 $^{24}\text{Mg}^+$ ビームに対して後追いでオーバーラップさせ、レーザー冷却を行っている。図12にレーザー冷却に使用している固体グリーンレーザー励起の色素レーザーを示した。この色素レーザーの出力を倍波生成器を用いて1/2の波長にして、冷却に使用している。このレーザーの周波数を図13に示したように入射・蓄積された $^{24}\text{Mg}^+$ のエネルギーの下限に対応する値から出発し、 $^{24}\text{Mg}^+$ の上限エネルギーまで掃引することにより、減衰せずに残るすべてのイオンをレーザーのバンド幅に対応するエネルギー幅の領域

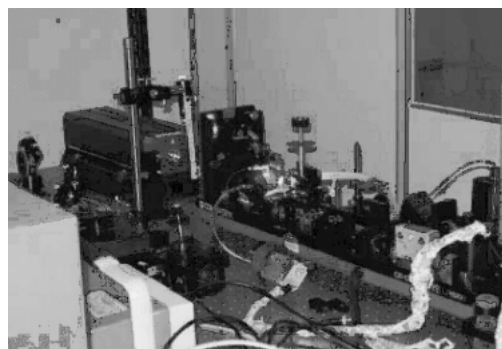


図12 固体グリーンレーザー励起の色素レーザー

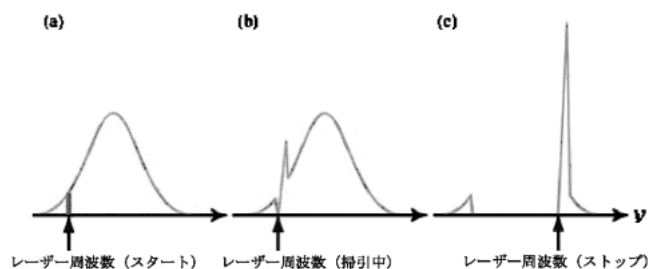


図13 レーザーの掃引によるイオンビームのエネルギー幅の縮減²⁴⁾

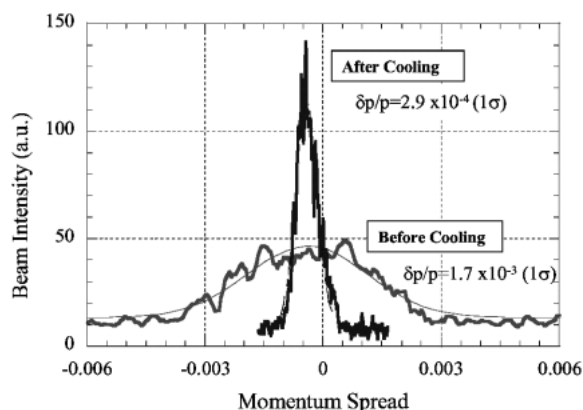


図14 $^{24}\text{Mg}^+$ イオンのレーザー冷却の効果

にガイドしてレーザー冷却が達成される。

図 14 に 1.7×10^{-3} の初期周波数幅を有する $^{24}\text{Mg}^+$ イオンに対してレーザー冷却と誘導電圧 ($\sim 6 \text{ mV}$) による減速を同時に加えた場合の 5 秒後のレーザーによるビーム冷却の様子を示した。この実験の場合 $^{24}\text{Mg}^+$ イオンの粒子数は $\sim 10^8$ 個であり、ビーム間相互作用による縦・横方向の運動エネルギーの結合のため、冷却後のエネルギー幅が 10^{-4} と比較的大きな値で平衡状態に達していると考えている。より低温の平衡状態を実現するためには粒子数の低減が必要となるが、その際に S/N 比を改善し少数の粒子でエネルギー幅、ビームプロファイル等の観測を可能とすることが必要となり、レーザーによって誘起される蛍光を用いた観測法の開発を鋭意進めている。

4.2 3次元レーザー冷却

前節ではビームの進行方向のみのレーザー冷却に関して考察した。我々の最終目標であるビームの結晶化の実現のためにはビームの進行方向と直交する横方向も含めた 3 次元の冷却が必要とされる。ドイツハイデルベルグのマックスプランク原子核研究所の TSR では、有限の分散関数を有する直線部でレーザー冷却を行い、縦方向レーザー冷却によるエネルギー変化に伴う平衡軌道の変化を利用して横方向の運動との結合を生じさせ、横方向の冷却も行う Dispersive Coupling スキームが実現されているが、その冷却レートは 1 sec^{-1} のオーダーであり、ビーム間相互作用の効果による縦・横両方向のエネルギーの授受に起因するものと同程度で、縦方向の冷却レートにははるかに及ばない²⁵⁾。

こうした状況の克服のため、岡本, A. Sessler, D. Möhl により

$$\nu_x - \nu_s = \text{integer}, \quad \nu_y - \nu_y = \text{integer} \quad (5)$$

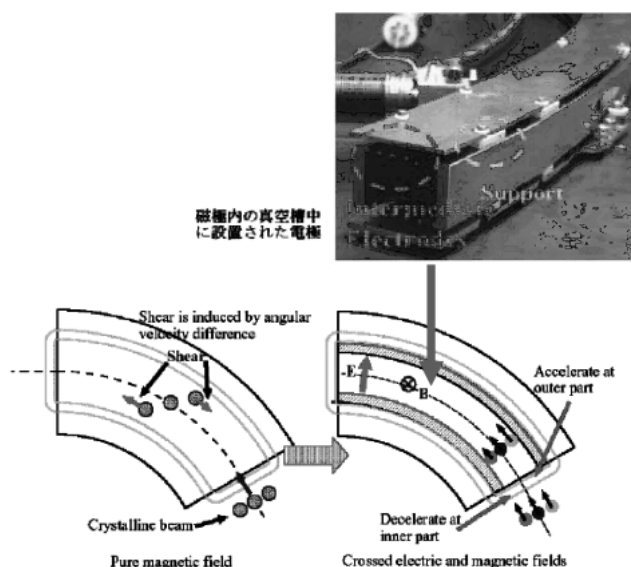


図15 Tapered cooling の実現のために S-LSR に導入された電場と磁場の重畳による無分散偏向要素。

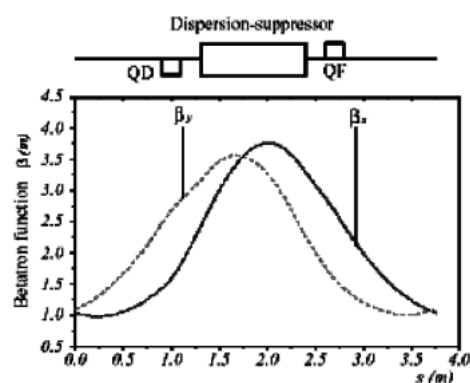


図16 動作点 (2.07, 2.07) における S-LSR の無分散ラティス

なる条件を満たすシンクロトロンチューン ν_s 及びベータトロンチューン ν_x, ν_y を用いる「シンクロベータトロン共鳴結合法」が提案されている²⁶⁾。S-LSR ではこの手法を用いて横方向のレーザー冷却を効率よく実現し、3次元の結晶化ビームを実現することを目指している。この過程でビームが水平方向の拡がりを持つようになるとレーザー冷却により同一のエネルギーにイオンを冷却した場合、図 15 に示したように軌道長の違いによる角速度の差が生じ Shear Force が作用し、結晶構造が破壊される。これを避けるため、“Tapered Cooling”²⁷⁾ 等の種々の工夫が提案されている。S-LSR ではこうした軌道長の差に起因する角速度の差を打ち消すため、図 15 右に示したように偏向部で通常の磁場にこれと直角方向の電場を重畳し、この電場の有する静電ポテンシャルの水平方向

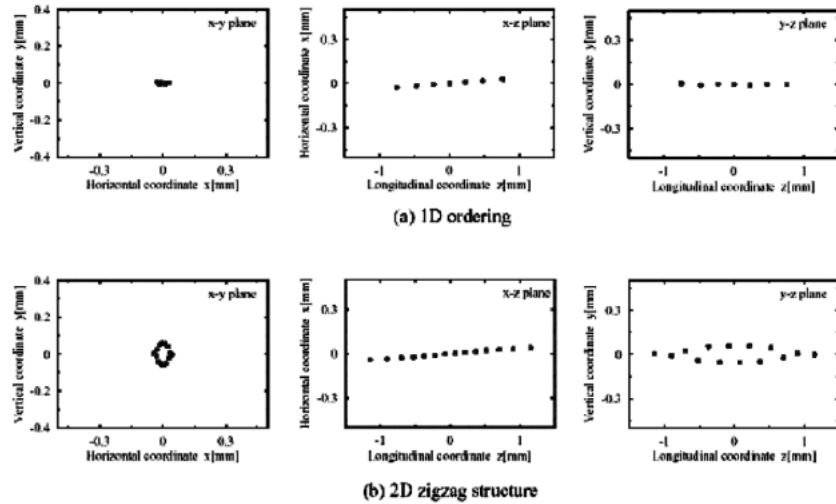


図17 S-LSR 無分散ラティスで実現が期待される1次元オーダリングと2次元ジグザグ構造（分子動力学によるシミュレーション結果）。

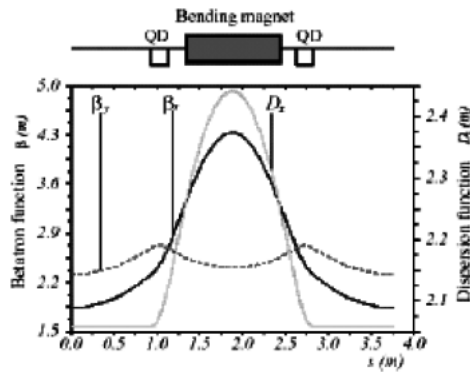


図18 3次元ビーム結晶の実現を目指す maintenance condition を満足するラティス。

の位置依存性を利用して、水平方向の位置に依存せずイオンの角速度が一定となるラティスを提案している．このラティスは線形近似では図16に示したように全周にわたって分散関数（Dispersion Function）がゼロとなっている²⁸⁾．分子動力学を駆使したシミュレーションによれば、このラティスで1次元のオーダリング及び2次元のジグザグ構造は実現できると期待される（図17参照）が、このラティスでは3次元のビーム結晶が安定に存在するために満たすべき、

$$\gamma < \gamma_t, \quad v_{x,y} < N_{sp}/4 \quad (6)$$

（但し、 γ_t はリングの遷移エネルギーに対応する γ 、 N_{sp} はリングの超周期性）が満たされていないため、3次元ビーム結晶の形成は困難と予想されている²⁹⁾．3次元結晶の生成に向けて式(6)の条件を満たす図

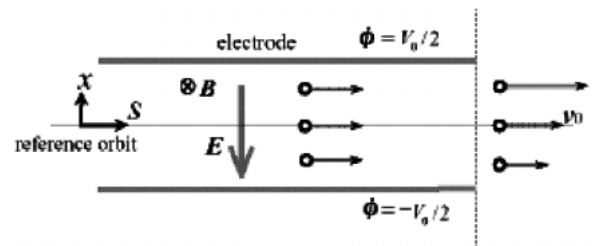


図19 Tapered cooling の実現のための Wien Filter（この内部でのみレーザー冷却が実効的に作用する）。

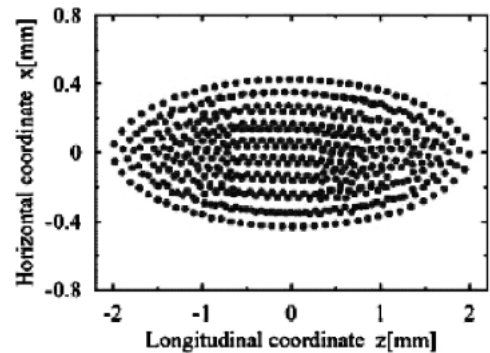


図20 S-LSR で実現を目指す 3次元結晶化ビーム

18に示したような動作点（1.44, 1.44）のモード（軌道分散は有限）において図19に示したような Wien Filter の内部でのみレーザー冷却を行うことで実現される tapered cooling を用いることにより、図20に示したような3次元ビーム結晶の実現を目指している²⁹⁾。

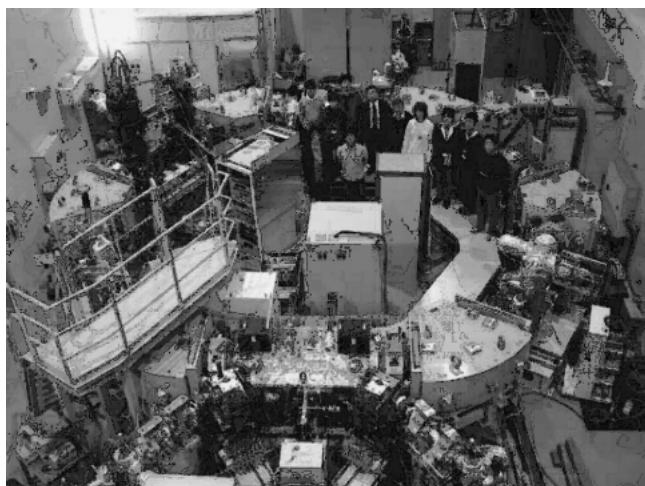


図21 S-LSR とその研究従事者（大学院生を中心とし他機関の共同研究者も1人含まれている）。

5. S-LSR の加速器科学における役割

以上 S-LSR の開発とこれを用いた最近の研究の成果の概要を紹介したが、最後のまとめに替えて S-LSR が加速器科学において、果たすべき役割について考察したい。

(1) 国際・国内共同研究の拠点—上に述べた S-LSR の建設は放射線医学総合研究所との共同研究として推進してきた。また、S-LSR リングの設計に当たってはビームの結晶化に関して理論的な研究を進めておられる広島大学の岡本氏の研究室と密接に協力して開発を進めた。また、ロシア、ドブナの連合原子核研究所（JINR）及びドイツ、ハイデルベルグのマックスプランク原子核研究所（MPI Kernphysik）とは電子ビーム冷却装置の設計に始まり、ホットイオンビームの電子ビーム冷却、極低温ビーム実現に向けてのレーザー冷却スキームの検討や 7 MeV 陽子ビームでの 1 次元オーダリングの実証において共同実験を実施してきた。これが世界初の陽子でのオーダリング実現につながったといっても過言ではない。また、電子ビーム冷却を用いたビームのスタッキング過程で観測にかかったビーム不安定性の観測とフィードバックダンピングによるその抑制に関しては SPring-8 の中村剛氏との共同研究を行った。S-LSR は加速器としては超小型の部類に属するが、ユニークな特徴を可能な限り盛り込んであるので、今後も共同研究の拠点として内外の関心ある研究者に開放し、ビーム物理学、加速器科学のプレイグラウンドとして広く活用したいと考えている。

(2) 加速器及びビーム物理分野における人材・後継

者育成の拠点—S-LSR は京都大学宇治キャンパスの化学研究所附属先端ビームナノ科学センターのイオン線形加速器実験棟に設置され、理学研究科物理学・宇宙物理学専攻の協力講座を構成する我々のビーム物理分科に所属する数多くの修士課程、博士後期課程の大学院生が装置の設計・製作及びビーム実験の遂行に於いて重要な役割を担ってきた。現在までに S-LSR 関連で学位を取得したのは博士が白井敏之、池上将弘、ファディル ヒシャム、藤本慎司の 4 氏に及び、修士ではファディル ヒシャム、藤本慎司、田邊幹夫、想田光、新宅宏基の 5 氏となっている。今後も優秀な若手研究者が S-LSR の活用により続々と博士、修士の学位を取得してくれることを願っている。他機関の共同研究者が殆んど含まれていないのが残念であるが、図 21 に平成 19 年 3 月時点で S-LSR での研究に従事していた大学院生、博士研究員等の若手研究者を全員含む記念写真を示しておく。

共同利用研究機関の加速器施設は大型化が進み、加速器そのものの設計や建設に大学院生が直接参加出来るチャンスは必ずしも多くはないが、我々の S-LSR ではスタッフの数が極めて限られていることもあり、仕事がつい反面大学院生が主体的に加速器の設計製作に取り組める状況が整っている。十分なマンパワーと予算を確保できていない状況の言い訳をするわけではないが、研究者として最も大切な自らの判断で行動するという姿勢を若いうちから身につけやすい環境にあると考えている。今後はこうした特徴を積極的に打ち出して関連研究機関とのネットワーク構築を通じてバーチャルな研究組織の構築を進め、人材養成・後継者育成に積極的に活用していく可能性も探りたい。

謝辞

本稿で紹介した研究活動は京都大学・化学研究所附属先端ビームナノ科学センター粒子ビーム科学研究領域及び放射線医学総合研究所・物理工学部、加速器エンジニアリング(株)の S-LSR 研究に従事するメンバーとの共同研究で遂行された。また、文中でも述べたが JINR 及び MPI Kernphysik との共同研究が成果達成に大きく貢献してきた。ここに記して厚く感謝の意を表したい。電子ビーム冷却装置の開発に当たっては(株)東芝から貴重な技術的サポートを頂いた。また、レーザー冷却の遂行は阪部周二教授のご好意により、大阪大学レーザーエネルギー学研究センターから色素レーザーを移管いただいたことにより可能となった。心から感謝の意を申し述べたい。この研究開発は文部科学省の先進小型加速器のための要素技術の開発の一環と

して推進してきた。この財政措置により本研究が達成可能となったことを記し、その実現に努力いただいた文部科学省の瀬谷道夫氏に心からの感謝の意を表したい。本研究の遂行に当たっては京都大学の「21世紀COE—物理学の多様性と普遍性の探求拠点」からも多大のご支援ご協力を頂いた。厚く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) E. Urakabe *et al.*, “Spot Scanning Using Radioactive ^{11}C Beams for Heavy-Ion Radiotherapy Beams for Heavy-Ion Radiation Therapy”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40**, 2540 (2001).
- 2) A. Morita *et al.*, “Design and measurement of a combined function magnet intended for a cancer therapy accelerator”, *Phys. Rev. ST-AB*, **4**, 122401 (2002).
- 3) A. Noda *et al.*, “Collection and Cooling Scheme of Heavy Ions Produced by a High Power Pulse Laser”, *Beam Science and Technology*, **6**, 21 (2001).
- 4) A. Noda *et al.*, “Phase Rotation Scheme of Laser-Produced Ions for Reduction of the Energy Spread”, *Laser Phys.*, **16**, 647 (2006).
- 5) A. Noda *et al.*, “Beam Cooling at S-LSR”, *Proc. of EPAC2004, Lucern, Switzerland*, 1360 (2004).
- 6) H. Fadil *et al.*, “Design of a compact electron cooler for the S-LSR”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **532**, 446 (2004).
- 7) G. Budker, “An effective method of damping particle oscillation in proton and antiproton storage ring”, *Soviet Atomic Energy*, **22**, 346 (1967).
- 8) T. Tanabe *et al.*, “Electron cooling experiments at INS”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **307**, 7 (1991).
- 9) K. Noda *et al.*, “Electron cooler for medical and other application at HIMAC”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **441**, 159 (2000).
- 10) T. Tanabe *et al.*, “An electrostatic storage ring with a merging electron beam device at KEK”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **532**, 105 (2004).
- 11) S. Nagaitsev *et al.*, “Experimental Demonstration of Relativistic Electron Cooling”, *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 044801 (2006).
- 12) H. Fadil *et al.*, “Electron cooling of longitudinally hot ion beams”, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*, **517**, 1 (2004).
- 13) H. Fadil *et al.*, “Electron beam cooling experiments at S-LSR”, *HIMAC Report*, HIMAC-11 (2006).
- 14) V. V. Parkhomchuk, “Physics of Fast Electron Cooling”, *Proc. of ECOOL84, Karlsruhe*, 71 (1984).
- 15) M. Steck *et al.*, “Anomalous Temperature Reduction of Electron-Cooled Heavy Ion Beams in the Storage Ring ESR”, *Phys. Rev. Lett.*, **77**, 3803 (1996).
- 16) H. Danared *et al.*, “Model and Observations of Schottky-Noise Suppression in a Cold Heavy-Ion Beam”, *Phys. Rev. Lett.*, **88**, 174801 (2002).
- 17) R. W. Hasse, “Theoretical Verification of Coulomb Order of Ions in a Storage Ring”, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3430 (1999).
- 18) J. Dietrich *et al.*, “Studies of Beam Dynamics in Cooler Rings”, *Proc. of COOL05, Galena*, 154 (2005).
- 19) T. Shirai *et al.*, “One dimensional beam ordering of protons in a storage ring”, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, 204801 (2007).
- 20) Ya. S. Derbenev and A. N. Skrinsky, “The Physics of Electron Cooling”, *Sov. Sci. Rev., Sect. A*, **3**, 165 (1981).
- 21) S. Fujimoto *et al.*, “Feedback Damping of a Coherent Instability at Small-Laser Equipped Storage ring, S-LSR”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **45**, L913 (2006).
- 22) T. Nakamura *et al.*, “Digital Feedback for Transverse Coasting Beam Instability at S-LSR”, *Proc. of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, 669 (2006).
- 23) T. Fujimoto, private communication.
- 24) 広島大学, 先端物質科学研究科, ビーム物理研究室のホームページより借用.
- 25) Lauer *et al.*, “Transverse Laser Cooling of a Fast Stored Ion Beam through Dispersive Coupling”, *Phys. Rev. Lett.*, **81**, 2052 (1998).
- 26) H. Okamoto, A. M. Sessler and D. Mohl, “Three-Dimensional Laser Cooling of Stored and Circulating Ion Beams by Means of a Coupling Cavity”, *Phys. Rev. Lett.*, **72**, 3977 (1994).
- 27) J. Wei, H. Okamoto and A. M. Sessler, “Necessary Conditions for Attaining a Crystalline Beam”, *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 2606 (1998).
- 28) M. Ikegami *et al.*, “Heavy ion storage ring without linear dispersion”, *Phys. Rev. ST-AB*, **7**, 120101 (2004).
- 29) A. Noda, M. Ikegami and T. Shirai, “Approach to ordered structure of the beam”, *New Journal of Physics*, **8**, 288 (2006).