

## 先進小型加速器事業

山田 聡

(独) 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県稲毛区穴川 4-9-1

### 概要

先進小型加速器事業は平成 13 年度 (2001 年度) に開始された。事業の目的は、まだ実用化されていない新しい技術を用いた小型の加速器の要素技術を開発することにより、加速器を用いた治療・診断および物質・材料科学、生命科学等への加速利用の促進を図ることにある。事業は放医研を含む合計 9 つの大学・研究機関の共同研究として実施されており、平成 17 年度末までに、主要な要素技術開発を終了させる計画である。

開発を行う加速器としては小型陽子・重イオンシンクロトロンおよび小型硬 X 線放射光源の 2 つに大別される。小型陽子・重イオンシンクロトロンは、薄膜に 100TW 級大強度短パルスレーザーを照射することにより発生する比較的高いエネルギー (数 MeV/u 程度) の陽子又は重イオンビームを直流リングへ入射・蓄積、電子ビームで冷却した後、高磁場パルス・シンクロトロンで 300 MeV/u 程度のエネルギーまで加速することを最終目標としている。

小型硬 X 線放射光源は、電子ビームとレーザーとの散乱により数 10 keV 程度のエネルギーをもつ硬 X 線領域の放射光を非常にコンパクトな装置で発生させるものであり、X バンド線形加速器と大強度のレーザーを蓄積するスーパーキャビティが主要な開発目標である。

### 1 はじめに

放医研では平成 6 年 (1994 年) から、高エネルギーの炭素線を用いたがん治療の臨床試験を行っており、平成 15 年 (2003 年) 2 月末までに肺がん、頭頸部腫瘍、前立腺がん、骨・軟部肉腫などを中心に 1,500 を越える臨床例を蓄積しつつある。この結果は外部の専門家で構成される重粒子ネットワーク会議での評価を経て、ホームページなどを通じて公開されている。これまでの臨床試験の結果、炭素線は X 線や陽子線が効果的でないとされる腺がんや肉腫などにも効果があること、通常 X 線や陽子線では 20 回を越える分割照射が必要とされている肺がんや肝臓がんに対し、数回の分割照射でも十分な治療効果を上げていることなどが示されてきた。このような成果を踏まえて、放医研では炭素線治療を高度先進医療に認定してもらうよう申請を行っており、間もなく認可が下りる予定である。

このような炭素線治療を一般に普及させるには、炭素線治療装置の小型化、低価格化が必要であり、放医研としてはこれまで装置の安定化、高精度化に関する研究と並んで治療装置小型化の研究を行ってきた。装置の小型化研究は短期的な要求に応えるための従来技術の直接的な延長研究と、比較的長期的な視野に立って更なる小型化を目指す研究とに大別される。このうち、従来技術をそのまま使用するものについては、現状の HIMAC における炭素線治療で使用している炭素ビームの仕様をほぼ達成するという条件で、図 1 のような設計例を提案しており、平成 17 年度 (2005 年度) 以降の建設に対応すべく具体的な R&D

が進行中である。[1]

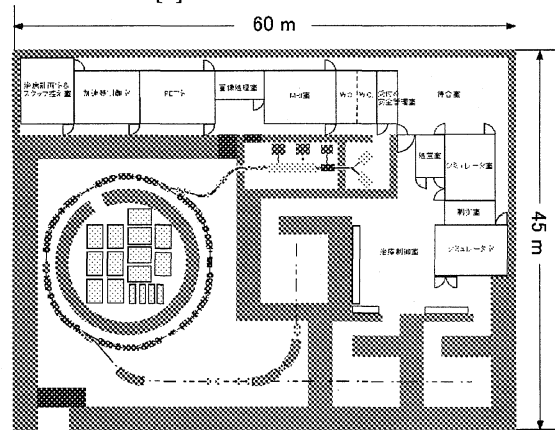


図 1. 小型炭素線治療装置

一方、長期的視野に立った研究として、平成 13 年度 (2001 年度) から先進小型加速器事業が文部科学省の電源開発促進対策特別会計の委託事業として開始されている。[2] 本事業は平成 10 年 (1998 年) に当時の科学技術庁政策研究所に設置された「加速器科学先端動向調査委員会」による関係機関への幅広い調査結果に基づいて、同研究所を中心に立案・計画されてきたものである。

開始時における事業の目的は、未だ実用化に至っていない新しい技術を用いた小型陽子・重イオンシンクロトロンおよび小型硬 X 線放射光源を実証製作することにより、加速器を用いた治療・診断および物質・材料科学、生命科学等への加速利用の促進を図ることとされ、医学への応用が強調されていることから、事業の実施段階になって放医研が取りまとめを行うこととなった。その後予算の制約上、実証器の製作は困難であるとの判断から要素技術の開発へと計画が縮小され、現在に至っている。

### 2 実施体制

事業の実施にあたっては、放医研が取りまとめ機関として一括して事業を受託し、実際に研究を実施する研究実施機関と放医研が共同研究を行うことによって事業を推進するというやや変則的な体制を採ることとした。事業を実施・支援するための組織として放医研内に先進小型加速器事業推進室を置き、事務局としての機能をもたせると共に、各研究実施機関の研究担当者が客員研究員等の形でここに所属し、放医研職員の身分を持って財産管理など行政的な責任を果たす一方で、分担研究を遂行することが可能となるような体制とした。また若手研究者の育成も重要な目標と位置付け、ポストドクを放医研が採用して各機関へ派遣することを可能とした。研究費を使用した物品購入だけでなく、国内外への研究者の派遣や招聘なども、比較的容易に行える体制が実現した。

共同研究に参加する機関は表1に示すように、放医研を含めて合計9機関に及んでおり、そのうち4機関が大学またはその付置研究所、施設である。研究の遂行に関しては、各研究実施機関の研究責任者と外部委員で構成される先進小型加速器開発委員会を設け、予算配分やポストクの採用など研究開発の基本方針を決定できる体制を整備した。本事業が開始される直前に、放医研がそれまでの国立直轄研から独立行政法人に移行していたことも、このような体制の構築に有利に働いたものと思われる。

表1. 先進小型加速器事業のテーマと開発分担機関

開発テーマ	開発分担機関
<b>I. 小型陽子・重イオンシンクロトロン</b>	
a. 100TW 級レーザーイオン源 ターゲット最適化	原研 関西研 東大 原子力工学研究施設 広大 先端物質科学研究科
b. ビーム蓄積・冷却装置	京大 化学研究所
c. 小型シンクロトロン*	KEK
d. F F A G 加速器	放医研
<b>II. 小型硬X線放射光源</b>	
<b>A. 大強度短パルス放射光源</b>	
a. レーザー・プラズマカソード*	東大 原子力工学研究施設 阪大 レーザ・核融合研究センター 産総研
b. Xバント電子線形加速器	東大 原子力工学研究施設 KEK
<b>B. 高フラックス放射光源</b>	
a. レーザー蓄積装置	KEK
b. 高品質電子ビーム源	東大 原子力工学研究施設 SPring-8

以下では、これまでに行われてきた要素技術開発の状況を小型陽子・重イオンシンクロトロンと小型硬 X 線源に分けて概観する。

### 3 小型陽子・重イオンシンクロトロン

#### 3.1. 全体構成案

粒子線によるがん治療を行うための加速器を小型化するために、イオン源・入射器としてレーザーイオン源を、また主加速器としてパルス高磁場シンクロトロンを用いることを想定した研究開発を行っている。100TW 級の大強度レーザーの照射により発生する高エネルギー多価イオンは広いエネルギー分布をもつため、シンクロトロンの

運動量アクセプタンスに収まるエネルギー幅を切り取るだけではビーム強度が不足する。そこで”ディバンチャー”として機能する高周波加速空洞と、電子ビーム冷却法を用いてビームの運動量幅を圧縮するビーム冷却用リング(内側リング)をイオン源とパルス・シンクロトロン間に追加することが考えられている。全体の構成案を図2に、また目標性能を表2に示す。この設計例ではシンクロトロンの出力エネルギーは300 MeV/uであり、図1のものと直接比較はできないが、大幅な小型化が実現できる見込みである。

表2. 小型炭素イオン加速装置目標性能

主要機器	主要性能	
レーザー	イオン	$^{12}\text{C}^{6+}$
	エネルギー	2 MeV/u
	ビーム強度	$10^9$ pps
	エネルギー幅	$\pm 5\%$ 位相回転後 $\pm 1\%$
冷却リング	エネルギー幅	$\pm 1\% \rightarrow \pm 0.1\%$
パルス シンクロトロン	最大エネルギー	300 MeV/u
	最大磁場	4 T
	周長	16.5 m
	加速時間	5ms
	繰り返し	5 Hz
	エネルギー アクセプタンス	$\pm 0.1\%$

#### 3.2. レーザーイオン源

現在、原研関西研、東大原子力工学研究施設と広島大学のレーザー装置を用いてイオン発生実験を行っている。このうち東大での実験に用いた装置を図3に示す。なお、この実験には東大の他、原研関西研、広大、京大のグループが放医研所属のポストクと共に参加している。レーザーは、波長800nm、ピークパワー3TW(=150mJ/50fs)で、これを $6 \times 10^{18} \text{W/cm}^2$ に集光してターゲットに垂直に入射させた。メインパルスとプリパルス(ペDESTAL)の強度比は $1:10^{-5}$ 程度であった。ターゲットとして、Taの5 $\mu\text{m}$ 厚のフォイルを使用した。測定結果を図4にシミュレーションの結果と合わせて示す。

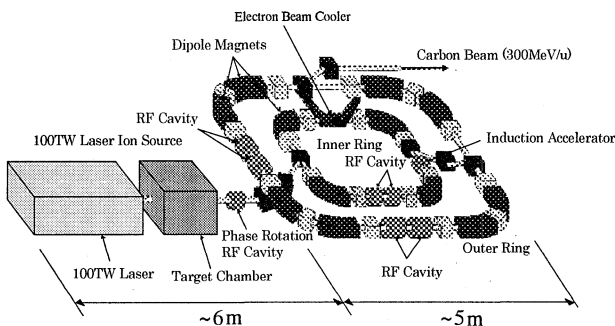


図2. 小型炭素イオン加速器全体構成案

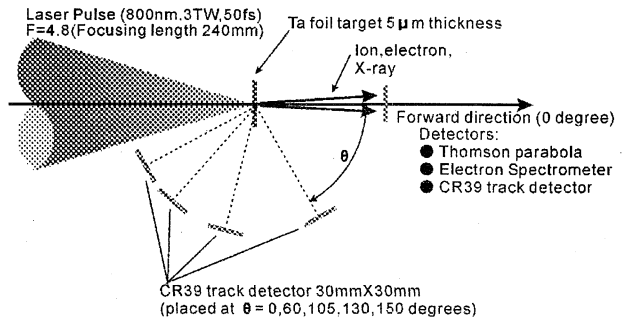


図3: 実験配置。

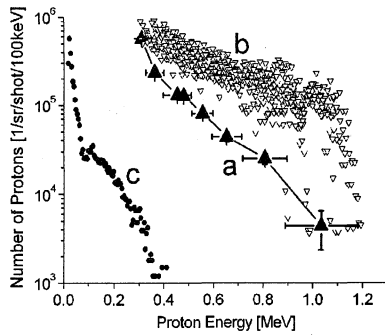


図4：前方でのプロトンのエネルギースペクトルの測定値とシミュレーション結果の比較。(a)は実験結果、(b)、(c)はそれぞれ臨界密度以下のプラズマスラブおよび高密度プラズマシートを用いたシミュレーション結果。定性的には臨界密度以下のプラズマスラブによる加速機構が実験結果をよく再現する。

レーザーイオン源で高エネルギーのイオンが発生する機構として、一般的にはレーザーパルスの輻射圧により、まずレーザープラズマ中の軽い電子が加速を受けてターゲット表面から飛び出し、その際の電荷分離によるクーロン場によってターゲット表面のイオンが加速されると解釈されていた。[3]図4には、このモデルに基づくシミュレーションもあわせて示したが、イオンのエネルギーが低すぎて、今回の実験結果を説明できない。

今回の実験のようにプリパルスレベルが比較的大きい場合、ターゲットはメインパルスの到来以前に裏面まで完全にプラズマ化していることが予想される。この部分にメインパルスが入射すると、レーザー光は、中心部のプラズマ中をプラズマ密度分布に起因する屈折率分布によりガイドされながら通過し、チャンネル中に電子プラズマ波(航跡場)を生じて、前方に高速電子を掃き出す。この電流によって超強磁場( $\sim 10^4$ T)とプラズマ中に大きなプラス電荷を残す。磁場は、数百フェムト秒からピコ秒の程度持続し、帰還電流がプラス電荷を打ち消すことを妨げるように作用するため、レーザーパルスがフェムト秒でも十分な加速時間が得られる。図4中bにこのような臨界密度以下のプラズマスラブによる加速機構[4]に基づいて原研のグループが行ったシミュレーション結果を示す。実験結果と比較的よく一致していることが分かる。

現在、原研関西研究所において本格的にイオン発生実験を行うための準備として、測定系の整備、補助レーザー(10TW)の整備などを行っている。またこれと並行して東京大学、広島大学ではプリパルスが高エネルギーのイオンや電子の発生に及ぼす影響など、ターゲットの最適化に関する研究を系統的に進めて行く予定である。

### 3.3 ビーム蓄積・冷却リング

連続スペクトルであるレーザーイオン源のビームを運動量アクセプタンスの小さいシンクロトロンで加速するために、まずレーザーにより生成されたイオンビームから分析電磁石を用いて中心値 $\pm 5\%$ のエネルギー範囲を切り取る。この際、必要なビーム強度を確保するために短パルスレーザーと位相同期した高周波電場を用いて縦方向位相空間における回転を起こし、エネルギー幅を $\pm 1\%$ まで

圧縮する。このための位相回転空洞の設計・製作は既に完了して今秋から実際にレーザーイオン源と組み合わせて性能確認を行う予定である。

ホットイオンビームの電子ビーム冷却に関しては、冷却時間の短縮方法を確立するために、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を用いた原理検証実験を推進している。これまでの電子ビーム冷却法では、電子の速度をイオンの速度分布の中心値に一致するように設定しておくのが一般的である。この方法では1%の運動量幅を持つ炭素イオンを0.1%の運動量幅まで冷却するには2.8秒を要することがTSRの実験を通して得られた。この時間を短縮するためにイオンの速度を掃引する方法と電子の速度を掃引する方法が試験された。イオン速度の掃引には誘導加速器が用いられ、上記と同じ条件で0.6秒という冷却時間が得られた。電子速度を掃引する方法では、運動量幅1%のイオンに対して0.35秒という冷却時間が得られている。

実際の冷却時間はイオンビームの空間的なサイズによって大きく変化すると考えられるため、実際にレーザーイオン源で生成されたイオンビームに対して位相回転及び電子ビーム冷却を適用してエネルギー幅を縮減するスキームを系統的に研究するために、イオン蓄積・冷却リングS-LSRを京大・化研内に設置するための機器製作が開始されている。[5]

### 3.3 小型陽子・重イオン・シンクロトロン

陽子と重イオンリングのラティス構造を1超周期について図5に示す。リングは4超周期で構成され、8箇所の長直線部に入出射機器、加速空洞、ビームモニター、補正電磁石などを配置する。重イオンリングでは陽子リングと同じ加速空洞を2箇所の長直線部に1台ずつ設置する予定である。偏向磁場の最大値は陽子リングと重イオンリングに対してそれぞれ3Tおよび4T、最大励磁電流は200 kAと270 kAである。リングの主要パラメータを表3に示す。[6]

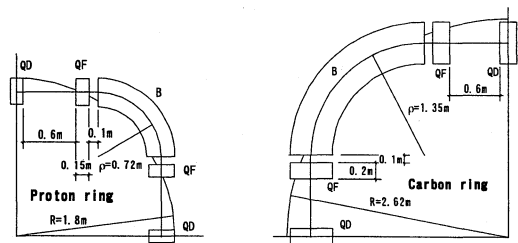


図5 陽子リング(左)と重イオンリング(右)。

ピーク磁場3Tの陽子シンクロトロン用パルス偏向電磁石について、偏向電磁石1台とパルス電源の製作を終了し動的磁場測定を行った。動的3次元磁場シミュレーションとの比較では、磁場分布は計算結果と一致していることが確認された。偏向電磁石のコイル配置や鉄心の飽和によって生じる6極成分は、偏向電磁石に取り付ける補正コイルでは十分に補正できないため、独立した6極電磁石の配置が必要となる。図6に磁場測定の結果を計算結果と並べて示しておく。

パルス励磁をすることによりコイル導体に発生する渦

電流や表皮効果の影響を低減するために銅の細線を束ねたストランドケーブルを使用してエポキシ樹脂含浸コイルを製作した。ストランド間の熱伝導が悪いため、繰り返し1 Hzで10 m sec幅擬似正弦波半パルス運転でコイルの温度上昇は約80°Cである。

表3 陽子・重イオンリングのパラメータ。

	陽子リング	重イオンリング
最大エネルギー	200 MeV	300 MeV/u
入射エネルギー	2 MeV	2 MeV/u
平均ビーム電流 (1Hz 運転時)	20nA	0.2nA
周長	11.9 m	16.47 m
軌道半径	0.72 m	1.35 m
ベータトロシ振動数 (水平/垂直)	2.25 / 1.25	2.25 / 1.25
遷移エネルギー	2.29 GeV	2.08 GeV/u
偏向電磁石		
ピーク電流	200 kA	270 kA
最大磁場	3 T	4 T
4極電磁石		
ピーク電流	15 kA	35 kA
最大磁場勾配 (QF/QD)	25.85 / 26.88 T/m	33.53 / 41.87 T/m
高周波加速系		
加速時間	5 msec	5 msec
周波数	1.6 - 14.3 MHz	1.2 - 11.9 MHz
ハーモニック数	1	1
加速電圧	13 kV	26 kV
加速空洞数	1	2
繰り返し	5 Hz	5 Hz

とから、ビーム要求タイミングに合わせてビームのON/OFFを行えるため患者の呼吸に同期した照射に適しており、今後発展が期待される三次元スポットスキニングによる照射法への応用も有望である。また、シンクロロンに比べて高磁場での運転が容易であり、加速器全体の小型化も可能である。

イオン源エネルギーから(炭素の4価イオン)、核子当たり400 MeVの最終エネルギーまで(炭素の6価イオン)二段の常伝導FFAG加速器でカスケード加速しようとする、各リングの粒子軌道の変位幅が大きくなり、電磁石及び加速空洞の動径方向サイズが大きくなるなど、製作性及び性能面でのデメリットを生ずる。これを防ぐために三段カスケードとすると、各リングの軌道変位をそれぞれ800 mm程度以下に縮小することができ、電磁石並びに加速空洞の製作上の問題が緩和されることが判った。

これらの設計作業と並行して高周波加速空洞のR&Dを進めている。空洞内に装荷する磁性材料には高透磁率磁性体材料ファインメットを利用して、同調不要の空洞の開発、中でも磁性材料としての性能を劣化させることなく効率的に冷却する方法の開発を目指し、小型コアを用いた試験を行い、実用化の目処を立てた。[8]

#### 4 小型放射光源の開発

小型放射光源は小型であるという特長を活かして冠状動脈造影など医学への応用を目指す大強度短パルス放射光源と、準連続ビームの特性を活かして蛋白質の構造解析など幅広い応用を目指す高フラックス小型硬X線放射光源とに分けて要素技術の開発が行われている。

##### 4.1 大強度短パルス放射光源

血管造影に用いられるX線はヨウ素のK吸収端である33keVの前後のエネルギーをもつことが要求される。このような高エネルギーX線を発生させるために、大強度のレーザーパルスと高エネルギー電子の正面衝突による逆コンプトン散乱を利用する。レーザー源として2J/pulse、パルス幅10ns、波長1,064nmのQスイッチNd:YAGレーザーを使用する。電子エネルギーは45 MeV以上であることが要求され、このためにXバンド熱カソード高周波電子銃を電子ビーム源として、電子加速器にはXバンド線型加速器を図7のように組み合わせた装置を試作し、性能テストを行うことを本計画の目標としている。[9],[10]電子ビームとしては20pC/bunchの強度をもつビームバンチを1μsの間87.5ps間隔で生成するマルチバンチ方式とし、これを50 Hzで繰り返す。Xバンドの加速管は1本しか使わない予定なので、これで電子を45 MeVまで加速するには実行加速効率として50 MV/mを越える値を実現する必要がある。

衝突点でのビームサイズが大きくなるとX線強度が下がることから、実現可能で、かつ許容可能なビームサイズの目標値をレーザー、電子ビーム共に0.1mm (rms値)とし、これを実現するためのXバンド線型加速器、ビーム輸送系を含めたビーム光学的検討を終え、部品の製作を進めている。またフォトカソード高周波電子銃の開発が間に合わないことを想定し、Xバンド熱高周波電子銃の開発を始めている。

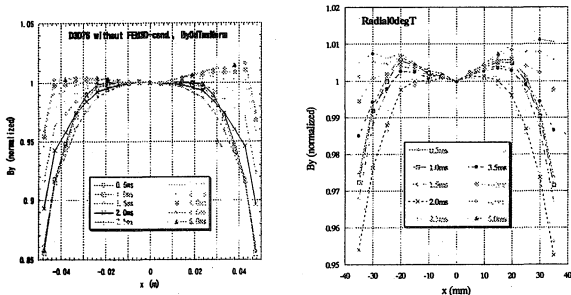


図6 電磁石中心における規格化した半径方向磁場分布、動的3次元磁場計算結果(左)と磁場測定結果(右)。

高周波加速空洞としては磁性合金コアを用いた2セル空洞を、また高周波加速電源には高周波電力増幅管をプッシュプル接続する方式を採用することにした。現在、このうちの1セル分を試作し、共振器としての特性の測定を行っている他、制御系等についてシミュレーション計算を含む詳細検討を行っている。[7]

#### 3.4 FFAG 加速器

固定磁場型加速器であるFFAGの利点は、シンクロロンでは実現不可能な高繰り返し加速が可能であるこ

