

CONSTRUCTION OF HIMAC INJECTOR (2)

S. Yamada, A. Kitagawa, T. Kohno, H. Ogawa, Y. Sato, Fu Shinian*
T. Yamada, T. Hattori[†], K. Sawada[†] and O. Morishita[†]

National Institute of Radiological Sciences, 4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba 263,

* On leave from Institute of Atomic Energy, Beijing, China,

[†] Tokyo Institute of Technology, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo 152,
and

[†] Sumitomo Heavy Industries, LTD., Soubiraki-cho, Niihama-shi, Ehime 792

Abstract: The construction of the heavy ion synchrotron complex, HIMAC, is expected to be completed during the next fiscal year. HIMAC will be the first heavy ion synchrotron dedicated to the medical use in the world. The injector system of HIMAC consists of two different types of ion sources, a 7 m long RFQ linac, a 25 m long Alvarez type linac and beam transport lines connecting them. The whole injector system is already installed in the new building, and waiting for the cooling water for the advanced tests.

HIMAC 入射器の建設 (2)

1. はじめに

がんの治療研究に使用するための大型シンクロトロン施設 HIMAC の建設は千葉市内の放医研敷地内において、おゝむね順調に進行している。治療ビームとしての重イオン・ビームは線量の集中性において優れているばかりでなく、対象とするがん細胞の酸素濃度によらない治療効果をもつなどの優れた性質をもっている。放射線療法は元々機能欠損が少ないという特長をもつために現在でも広く普及しているが、その中でも重イオンを用いたがん治療は最も効果の期待される分野の一つであるといわれている。

重イオン・ビームを実際の治療に応用するための HIMAC 施設の建設は世界に先駆けて 1987 年にスタートしており、入射器系の新建屋への搬入・据付は本年 3 月より開始されている。

2. 入射器の概要

HIMAC は Ar 程度以下の比較的軽いイオンを最大 800 MeV/u にまで加速する装置で、主加速器には平均直径約 40 m のシンクロトロンを採用している。入射器系はイオンの生成から 6 MeV/u までの初期加速と全電離状態への荷電変換までを受け持っている。図 1 に HIMAC 入射器系の全体配置図を示す。重イオンを生成するためのイオン源には PIG と ECR という異なる種類のイオン源を 2 台用意している。PIG は主として Si 程度までの比較的軽いイオンを、また ECR は Si より重いイオンの生成に使用される。治療用には He から Ar までのイオン種が想定されており、イオン源強度として例えば C^{2+} なら 160 μA 、 Ne^{3+} なら 140 μA 程度得られれば、一回の治療時間を一分程度以下に抑えることができる。現状では PIG、ECR 共にこの値を十分実現できる見込みである。

イオン源には最大 60 kV の直流高電圧が印加され、重イオンが 8 keV/u のエネルギーをもつように調整される。ただし次段の RFQ リナックで受け入れ可能なイオンは N^{2+} や Si^{4+} などイオン価数と質量数の比 (q/A) が 1/7 より大きい値をもつものに限られる。LEBT 系の集束要素にはアインツェル・レ

ンズ、静電四極電極、ソレノイド・コイルが使用されている。真空用シール材には原則として金属が使用されており、全長約 9 m にわたって 10^{-7} Torr 台前半の真空度を目標としている。RFQ リナックは直径約 60 cm、ヴェイン長約 7 m と世界最大級の大きさを持ち、100 MHz で運転される。RFQ 出口でのイオン・エネルギーは 800 keV/u である。RFQ への投入電力は最大 300 kW (ピーク)、ヴェイン間の設計電圧は 81 kV (1.8 Kilpatrick) である。

RFQ に続いて全長 24 m のアルバレ型リナックがあり、その出口で重イオンのエネルギーは 6 MeV/u となる。RFQ とアルバレ・リナックの間には荷電変換用のフォイルを置かず、アルバレ・リナックでも $q/A \geq 1/7$ のイオンを加速可能とする。アルバレ・リナックは合計 3 ケの独立したキャビティに分かれており、プレート電源を共有する 3 台の独立した大電力増幅器からそれぞれ電力を供給されるようになっている。周波数としては RFQ と同じ 100 MHz を採用しているため、共振器の直径は約 2 m と大型となる。ドリフト・チューブ内には一つおきに、パルス四極電磁石が組み込まれており全体として FODO 型の集束形式を採用している。

HIMAC は医療用の加速器として安定した動作が要求されており、これに応えるために入射器系としてはイオンの価数あるいは強度などを含め、比較的ゆとりのある設計としてある。また荷電変換器も、6 MeV/u に一ヶ所だけ置くことにして Ar までの全てのイオンを全電離状態として後段のシンクロトロンに入射することになっている。入射器系の主要パラメーターを表の形式で示す。

3. 入射器建設の現状

アルバレ・リナックの 3 ケの共振器うち、第三共振器の低電力及び大電力テストについては既に報告済みであるが、これに引続き第一、第二共振器のテストも住重・新居浜製造所において無事完了した。大電力を導入した状態での長時間テストにより、AGC・AFC などの低電力制御回路が予定通りの性能を発揮したほか、三共振器の並列運転テストを含めてほぼ設計通りの結果が得られている。

RFQ についてはヴェインの製作過程で若干のトラブルが発生したが、ほぼ予定通りに組み立て・調整を完了した。ヴェイン電圧の調整には固定式のサイド・チューナーを用いているが、長手方向に最大 4.9 %、回転方向には最大 2.6 % とビーム加速には問題とにならない程度にチューニングされた。

PIG イオン源は従来から放医研内のテスト・スタンドにおいて熱陰極型 PIG イオン源を用いたパルス運転のテストを行ってきたが、イオン強度・長時間安定度など十分満足できる結果が得られている。また ECR イオン源は東大核研・東工大などとの共同研究の結果、シングル・ステージ型を採用することによって、小型で世界レベルから見ても性能のよいものを開発することができている。現在はマイクロ波の導入方法の改良、アフター・グロウ効果の系統的な研究などを行っている。

本年 3 月より、入射器系を構成する全要素の新建屋への搬入・据付工事が開始された。現在までにこれらの精密据付、組み立て、真空テストなどが完了している。間もなく制御計算機との接続を含む配線工事が行われ、本格的な稼働テストが行われる予定である。今後、冷却水などの周辺設備の整備工程に合わせて、現地での大電力テストなどが行われるが、入射器系のビーム・テストは当初予定に比べて若干遅れ、1993 年春頃となる見込みである。

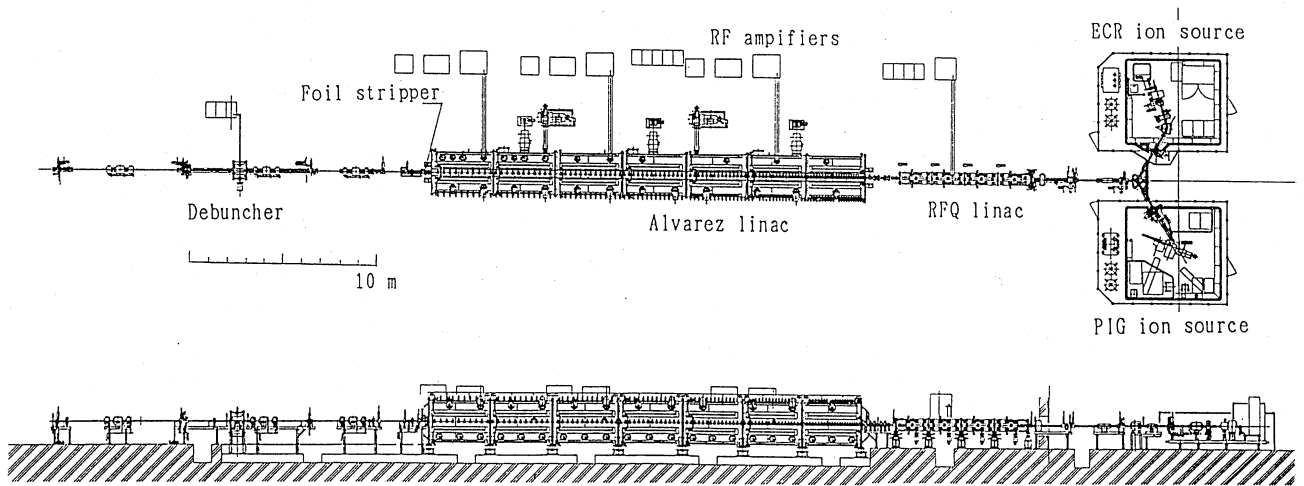


Fig. 1: HIMAC 入射器系全体配置図

表
HIMAC 入射器主要パラメーター

イオン源	
形式	PIG & ECR
イオン種	${}^4\text{He} \sim {}^{40}\text{Ar}$
q/A	$\geq 1/7$
リナック	
周波数	100 MHz
繰り返し	最大 3 Hz
デューティ比	最大 0.3%
アクセプタンス	$0.6 \pi \text{mm} \cdot \text{mrad}$ (規格化値)
RFQ リナック	
入出射エネルギー	8 / 800 keV/u
ヴェイン長	7.3 m
共振器直径	0.6 m
最大表面電界	205 kV/cm (1.8 Kilpatrick)
必要電力 (ピーク)	260 kW (70% Q)
アルバレ・リナック	
入出射エネルギー	0.8 / 6.0 MeV/u
全長	24 m (3 共振器)
共振器直径	2.20 / 2.18 / 2.16 m
平均軸上電界	1.8 / 2.1 / 2.1 MV/m
シャント抵抗	31 - 47 M Ω /m (実効値)
最大表面電界	150 kV/cm (1.3 Kilpatrick)
必要電力 (ピーク)	850 / 810 / 750 kW (80% Q)
集束形式	FODO (最大 6.0 kG/cm)

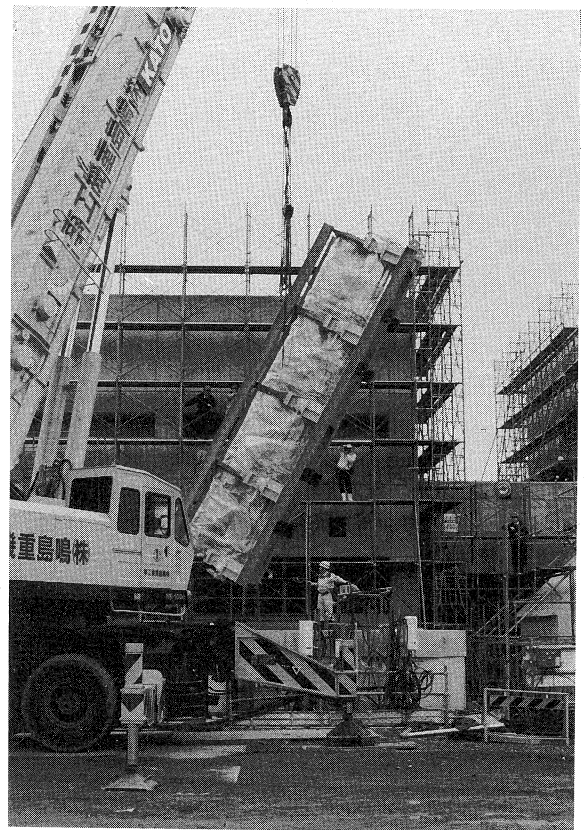


Fig. 2: RFQ の搬入風景