

小型サイクロトロンへの挑戦

熊田幸生

住友重機械 量子機器事業センター

1. はじめに

小型加速器の開発は、日本では1970年後半から始まった。当初、サイクロトロンは原子核実験に用いられたため、どちらかといえば高エネルギーの加速を目指し、大型化の傾向にあった。わが国では理化学研究所や大阪大学、東京大学原子核研究所での研究開発が進み、重量にして100トンから400トンという、一体型マグネットのサイクロトロンが次々に開発されることとなる。1980年代に入り、大型化はますます拍車をかけ、分離セクター型のサイクロトロンが理研(写真1)と大阪大学で建設された。一方、サイクロトロンは、小型でも比較的高エネルギーのイオンを加速できることから、医療、産業応用の小型サイクロトロンの開発が始まりつつあった。医療ではPET(陽電子放射断層写真)に用いる短半減期のトレーサー(^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 、 ^{18}F)を製造するためのサイクロトロンがメーカーの手によって開発された。日本では、日本製鋼所(JSW)が理研と共同開発を行い、陽子で10MeVの超小型サイクロトロンの開発を成功させた。本装置は日本最初の病院内サイクロトロンとして、東京都中野病院に納入された。

1980年には住友重機械がPET用小型サイクロトロンをフランスのCGR-MeV社と共同で開発し、1982年に1号機を京都大学附属病院に納入した。以降1980年代は、1年間に1~2台程度の生産台数で低迷しながら経過する。1990年代に入り、負イオン型の加速器が開発され、操作性、信頼性が向上した。また時を同じくして、放射性薬剤のFDG(Fluoro Deoxy Glucose)の製造方法に、水ターゲットを用いて製造する方法(ハマッハー法)が採用され、癌診断の保険適用とあいまって急速にマーケットが開くこととなる。

2. PET用小型サイクロトロン

Positron Emission Tomography (PET) による、代謝機能の診断技術が1980年代に黎明期を迎え、PET診断トレーサ製造用のサイクロトロンが次々に開発された。PETに用いられる放射性同位元素は、陽電子崩壊を起こす比較的軽い元素が用いられた。これらの元素の製造には、10~15MeVの陽子と、8MeV前後の重陽子が用いられた。主な核反応を表1に示す。



写真1:理化学研究所の分離セクター型サイクロトロン。
(K=540MeV)総重量は2400トンにもなる。

表1. 陽電子放出核種と製造核反応

核種	陽子反応	重陽子反応
^{11}C	$^{14}\text{N}(p, \gamma)^{11}\text{C}$	
^{13}N	$^{16}\text{O}(p, \gamma)^{13}\text{N}$	
^{15}O	$^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$
^{18}F	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$	$^{20}\text{Ne}(d, \alpha)^{18}\text{F}$

製造に必要なビーム電流値は10~50 μA 程度とされた。1980年代はPETサイクロトロン

ンの第1段階の開発期で、日本では日本製鋼所、住友重機械（写真2）、少し遅れて島津製作所が小型サイクロトロン（写真3）の自社開発を行った。海外ではTCC社（米）、SCANDITRONIX社（スウェーデン）、CGR-MeV（仏）が相次いで新型機種を開発し、PET市場に期待を掛けた。この第1期のサイクロトロンは、プラス・イオン（p、d）を加速し静電デフレクタで引き出すタイプ



写真2：住友重機械製 CYPRIS325型の初号機。加速エネルギーは陽子15MeV、重陽子7.8MeV。ターゲットは1ポートに8連のリボルバータイプのターゲットが装着された。京都大学附属病院納入（1982年）。

が主流であった。各社とも、小型化を目指していたので、引き出し半径を小さくするために、平均磁場を高い値に設計する傾向が主流であった。そのため、磁石の平均ギャップを小さくし、また磁場のフラッター（磁場の山谷の強度）を下げて、セクターにスパイラル角度を付けたものが多かった。その結果、以下に示すような設計限界に起因する不安定性が見受けられた。

- 1) 磁極ギャップが小さいため、高周波電極の放電が多く発生。電圧を35kV程度に。
- 2) 磁場が高いので、引き出し静電デフレクタの電界強度が高く放電が頻発した。
- 3) 磁場が高く、加速電圧が低いため、引き出しのターンセパレーションが小さくなり、引き出し効率が50%程度に留まった。そのため、セプタム電極がビームで溶融するなどのトラブルが発生した。

日本製鋼所のベビーサイクロトロンは、磁極の谷（バレー部）に加速電極を配置し、セクターギャップを小さく出来る設計であったが、静電デフレクタを、加速電極同様にバレー部に配置させる必要があったため、スパンアングルが十分に取れず、電界強度を上げざるを得ない設計となっていた。また、デフレクタは、ビームの約半分が損失する場所であったので、その放射化はメンテナンス時に作業者の被曝を伴う“厄介な代物”であった。

3. 負イオン加速への挑戦

1990年に入り、TCC社からドロップアウトしたエンジニアたちが、負イオン加速の技術を駆使して、CTI社から画期的なPET用サイクロトロンを発売した。（CTI社RDS112）。時を同じくして、OXFORD社は超伝導の負イオンサイクロトロンを、IBA社はCYCLONEシリーズと続々と新規参入のメーカーが増えた。負イオン加速器の特徴は下記に示すとおりで、今までのサイクロトロンの問題点を一挙に解決するような『夢のサイクロトロン』であった。

- 1) 引き出し効率100%で残留放射能無し。
- 2) 2ポート同時照射可能。（図2参照）
- 3) デフレクタが無く安定運転
- 4) ビームサイズが小さく¹⁸Oターゲット水の容積を2ml以下に出来る。
- 5) 自己シールドで普通の建屋にも設置可能

負イオン加速の技術は、当時の国産メーカー

は対応が難しいと考えられていたが、住友重機械は2年間の開発期間を掛けて91年に純国産の負イオン加速器『HM-18』を市場投入した(写真3)。さらに、日本鋼管はOXFORD社の超伝導サイクロトロン of 輸入販売で新規参入をすることになる。一方、それまでの国産サイクロトロンのパイオニアである日本製鋼所は、自力開発を断念し、米国CTI社からの輸入販売を選択した。



写真3: 住友重機械製の負イオン加速サイクロトロン。加速エネルギーは陽子 18MeV、重陽子 10MeV。ターゲットは8個装着可能。(1992年)

負イオン加速器の特徴がユーザーに理解されるにつれて、正イオン型のサイクロトロンはPET市場からは駆逐された。その様子を図1に示す。特に2002年の保険適用を受けてからのPETサイクロトロンの需要は爆発的に伸びており、2004年末には設置台数は100台を超える勢いである。

4. 省エネへの挑戦

第1世代の小型サイクロトロンで、小型化の落とし穴は、磁場を高くして、引き出し半径を出来るだけ小さくするところにあった。磁場を上げるために、磁石コイル電流が急激に高くなり、そのために消費電力が100kWを超える有様だった。(図3)

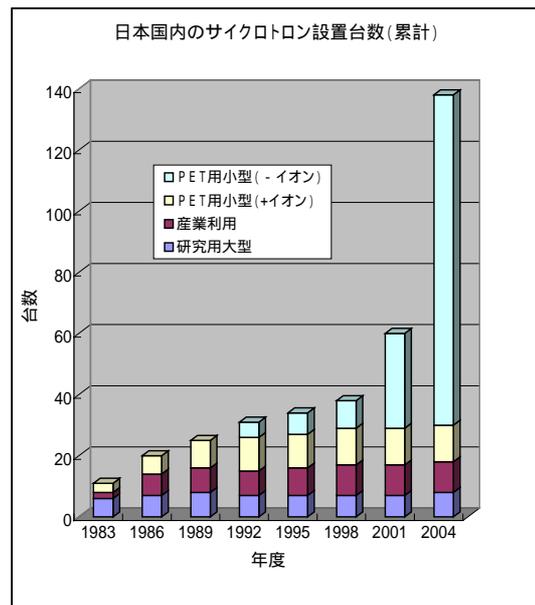


図1: 国内のサイクロトロンの設置台数(累計) 負イオンのPET用サイクロトロンが爆発的に普及を始めている。

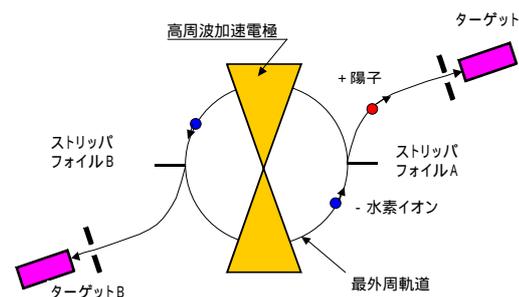
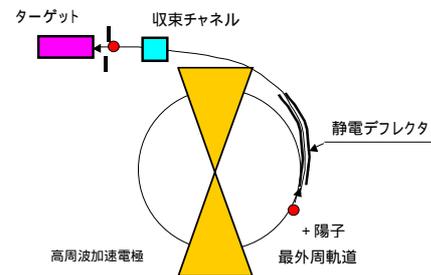


図2: 負イオンサイクロトロンの束引き出しの模式図。ストリッパフォイルを2箇所挿入し、2ポートを同時に照射することが出来る

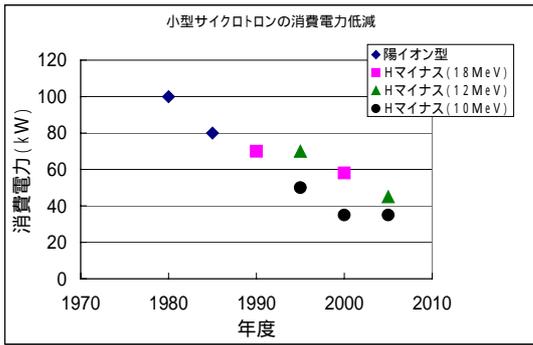


図3：省電力への歩み。当初100 kW程度の消費電力だったが、技術革新もあいまって、40 kW前後の消費電力まで下がった。

その後、負イオン加速の開発に伴い磁場を下げて、消費電力を下げる努力が行われた。さらに省エネルギーを目指した超伝導サイクロトロンは、コイルの消費電力は小さいものの、液体ヘリウムの充填やメンテナンスにコストが掛かるというデメリットがあった。そのためOXFORD社の『オスカー』は後継機の開発を断念し、市場から消える運命をたどった。小型化により、本来病院サイドが受けるメリットは『低コスト』でなければならなかったのだ。

5. 自己シールドへの挑戦

1990年に登場したCTI社製のRDS112は洗練されたデザインの自己シールドを持つ画期的な装置であった。その後継機RDS111もまたよりコンパクトな自己シールドを標準装備した装置である(写真4)



写真4：CTI社製のRDS111(CTI社HPより抜粋)11MeVの⁻H専用機。

一方ヨーロッパの老舗であったスカンジトロニクスは、サイクロトロンビジネスに失敗し、倒産に至るが、GE(米国)がPET部門を買収し、新たな負イオン加速器の開発投資を行っていた。16 MeVクラスの『PETTrace』で成功収めたGEは、世界最小の自己シールド型サイクロトロン『MINITrace』(写真5)を開発した。国産マシンで本格的な自己シールドを持たなかった住友重機械は、GE社の技術導入を決断。10 MeVクラスのミニトレースを国内で販売すると共に、GEの技術を買取り国産化を行うことになる。

この装置の特徴は、設置面積を最小にするため、サイクロトロン本体を垂直に立てた形にしているところにある。こうすることで、ビームの前方方向を床方向に限定でき、シールドの厚みを減らすことに成功している。加えて、『観音開き』構造をもつ自己シールドは、床へのレール設置の必要も無いので、設置工事の短期化にも一役買っている。



写真5：GE/住友製の世界最小PETサイクロトロン。マイナスの水素原子を9.6MeVまで加速する。自己シールド型

6. 高収量への挑戦

国内で院内サイクロトロン市場が立ちあろうとしている頃、米国と欧州では、FDGのデリバリサービスが立ち上がろうとしていた。院内でのFDG製造と異なり、デリバリメーカーでは1回の照射で大量のFDGを合成する必要が出てきた。そのために、サイクロトロンのターゲットからの ^{18}F 収量も、2時間照射で8 Ci (300 GBq) を超える性能が要求され始めた。このようなユーザーの要求に答えるため、各社は、大強度のビーム電流に耐えうるサイクロトロンとターゲットの開発を進めた。GE社は、このデリバリマーケットで成功したが、専用機であるPETTraceは、2時間照射で8 Ciの ^{18}F を保証している。またCTI社もイオン源の改良を行い、2時間で6 Ciの能力を持つ『Eclips』を発売した。大量のビーム照射に耐えうるため、各社は2 mL程度の水ターゲットに1 kW以上ものビームを照射できる冷却構造の改良に腐心した。当初、材料はチタンが主流であったが、大量の熱を冷却するために、銀やニオブなどが用いられるようになった。また、高温になってもターゲット水が沸騰しないように、30~40気圧まで加圧するような構造が採用された。耐圧を上げるためにフォイルを厚くするわけには行かないので、フォイル直径はますます小さくなり直径12~15 mmまで小型化された。国産では住友重機械も高収量のターゲットの開発に取り組み、HM-18では2時間で10 Ciの収量を達成している。

さらに、PET用サイクロトロンとしては中型クラスとなる自己シールド型の『HM-12S』を開発し、高収量化を達成している(写真6)。2ポート同時照射で7 Ci / 2時間および、シングル照射でも5 Ci / 2時間の性能を引き出すまでに至っている。

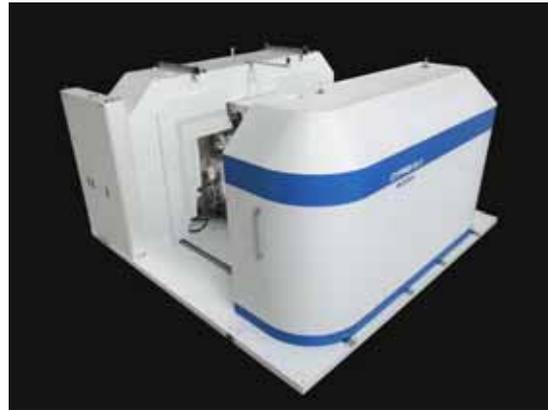


写真6：住友重機械『HM-12S』。自己シールドで垂直型のレイアウト。2時間照射で最大7 Ciの ^{18}F ターゲット収量を引き出す。エネルギーは12 MeV



写真7：GE社製『PETTrace』。垂直型のレイアウト。2時間照射で最大8 Ciの ^{18}F ターゲット収量を引き出す。エネルギーは16 MeV (GE社のHPより)

表2：各社のサイクロトロン性能比較 (2003年現在)

	臨床用サイクロトロン			PETセンター、デリバリー用				
	住友HM10 (MINITrace)	IBA 10/5	CTI RDS111	住友HM12	住友HM18	IBA 18/9	GE- PETTrace	CTI-Ecrips
陽子エネルギー (MeV)	9.6	10	11	12	18	18	16	11
重陽子エネルギー (MeV)	-	5	-	6	10	9	8	-
-Fターゲット収量 (Ci/2h)	1.5	1.6	1.6	7	10	8	8	6
消費電力 (kW)	35	40	35	45	50	50	70	35
自己シールド	付き	オプション	付き	付き/無し	オプション	オプション	付き/無し	付き



写真8：IBA社製 CYCLONE18/9

ケットが飽和状態になると、アジアでは中国市場に自ずと熱い期待がかかってくる。事実、中国ではPETの市場が開けつつあり、今後の小型サイクロトロンの主戦場は中国になる可能性が高い。また近い将来は、中国国内で生産されたサイクロトロンが、低価格で市場を席巻する可能性も出てくるだろう。

7. 最後に

小型サイクロトロンの開発の歴史と、開発の目標、技術的な課題等について概説した。単に小型化だけではマーケットの広がりはいまだに望めなかったと思われる。メーカー各社のコストダウンによる低価格化と、信頼性向上の活動があって初めて、現在のPETマーケットの急激な立ち上がりが達成されている。

日本のマーケットは2001年の、FDG薬剤の保険適用を受けて、150台程度のPET用サイクロトロンの普及が予測されている。しかしながら、北米と欧州の状況を見ていると、デリバリーが始まるに連れて、サイクロトロンの設置台数も頭打ちになる懸念がある。日本のマー