最先端研究を支える粒子加速器と加速器技術を応用した高精度放射線治療装置

Particle Accelerator Products for Advanced Research and High-precision Radiation Therapy Equipment using Accelerator Technology

機械・設備システムドメイン
事業戦略総括部
事業開発推進部
先端機器営業グループ
☎(03)6716-3651

素粒子物理学や放射光物理学などの最先端研究で利用される粒子加速器は，電子，陽子などの荷電粒子を光速に近い高エネルギー状態まで加速する装置である。当社では，この加速器の心臓部となる各種加速空洞や加速管を国内外の研究機関に納入している。あわせて加速器向けの最先端製造技術の開発も社内で行っている。また，社内開発した超小型加速管を搭載した高精度放射線治療装置 Vero4DRT（販売名 線形加速器システム MHI-TM2000）を製品化している。ここでは，超伝導加速空洞，常伝導加速管及びその応用製品である放射線治療装置について紹介する。

1. 超伝導加速空洞

1.1 特徴

超伝導加速空洞は，空洞を構成するニオブ材を液体ヘリウムなどの冷媒により極低温に冷却して超伝導化することで電気抵抗をほぼゼロとすることができる。このため，無酸素銅材を使用する常伝導加速管に比べて高周波損失を大幅に低減でき，主として高い加速電界で連続波的に運転する加速器に用いられる。

1.2 適用先

超伝導化には大規模な冷媒供給・回収設備が必要であり，適用先は主として大型の素粒子物理研究用加速器である。当社は，2008 年ノーベル物理学賞の検証実験にも貢献した高エネルギー加速器研究機構（KEK）の電子－陽電子衝突型加速器（KEKB）向けに“超伝導クラブ空洞”を納入している。海外では，台湾国家同歩輻射研究中心（NSRRC）で建設中の台湾放射光施設（TPS）に設置する“超伝導加速モジュール”を納入している。

また，日本への誘致が期待され，物質の起源や宇宙誕生の謎に迫る“国際リニアコライダー（ILC）計画”向け及び次世代放射光光源として期待される“エネルギー回収型加速器(ERL)”向けにそれぞれ9セル型超伝導加速空洞の試験機を開発し納入している（図1）。

1.3 製造技術

超伝導加速空洞では，ニオブ材中の微小不純物の混入や，空洞内面に微小な欠陥や突起があると，高い電界を得られないため，以下のような製造技術を適用している。

(1) 高精度成形技術：空洞を構成する半球状セルを精度良くプレス成形する技術

(2) 高精度電子ビーム溶接技術：半球状セルを接合して空洞を形成する際に，溶接部内面を平滑化するとともに不純物混入を抑制するために高清浄な真空中でセルどうしを電子ビームで精密溶接する技術（図2）

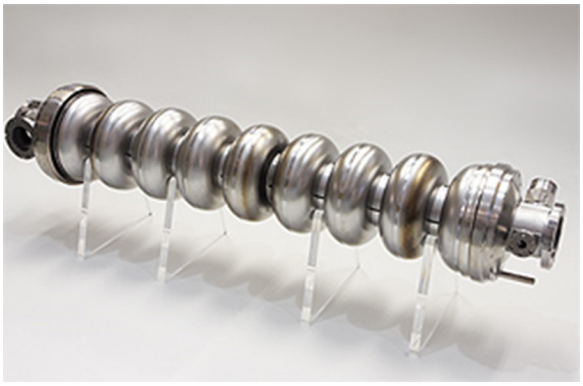

図1 ILC 計画向け9セル型超伝導加速空洞試験機

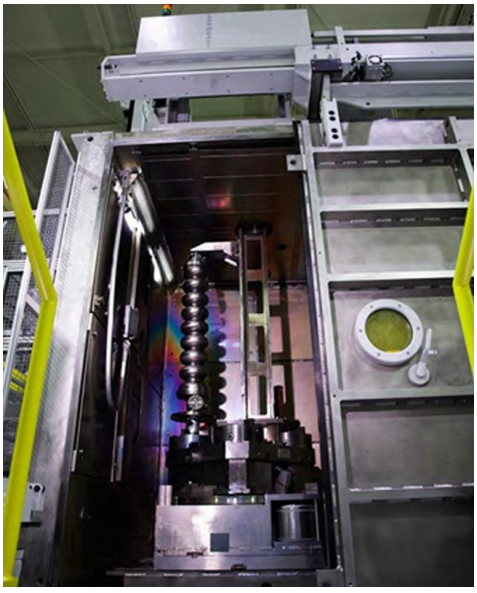

図2 超伝導加速空洞用電子ビーム溶接機

2. 常伝導加速管

2.1 特徴

常伝導加速管は主として無酸素銅材で構成され，室温で運転されるため，超伝導空洞に比べて付帯設備が少なく，加速管の清浄度管理もやや緩和できる。一方，超伝導空洞に比べて高周波損失が大きく，連続波的な運転には向かないが，パルス運転することで非常に高い加速電界を得ることができる。質量の軽い電子を加速する電子加速管と重い陽子を加速する陽子加速管では，加速管の基本構造が異なり，一般的に陽子加速管の方が大型である。

2.2 適用先

電子加速管は，リング型加速器へのビーム入射用として，KEK や大型放射光施設 SPring-8 などに納入されている。また，(独)理化学研究所向けX線自由電子レーザ“SACLA”の主加速器には当社独自の“Cバンドチョークモード型加速管”が採用されている。海外では，韓国の浦項加速器研究所(PAL)で建設中のX線自由電子レーザ計画向けに“準対称型Sバンド加速管”を納入している。(図3)

陽子加速管は，(独)日本原子力研究開発機構(JAEA)と KEK が共同で建設した大強度陽子加速器施設(J-PARC)の主加速器として採用されている。また，加速した陽子を特殊ターゲットに照射して中性子を発生させ，この中性子をがん治療や非破壊検査等の産業分野に応用する民生向けの取り組みも始まっている。

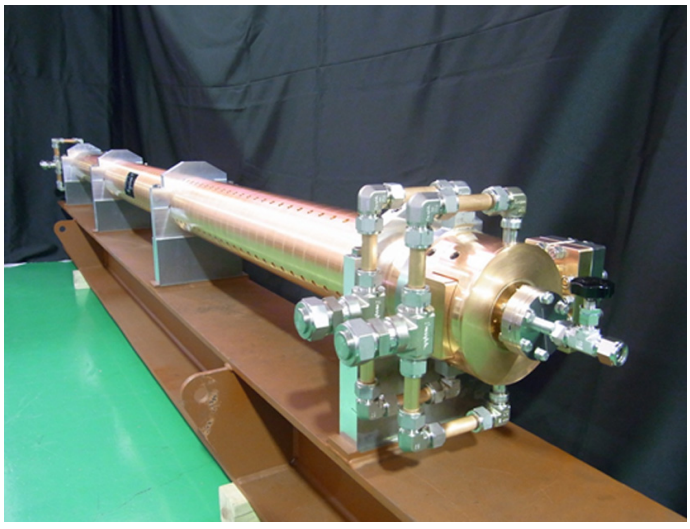

図3 準対称型Sバンド加速管

2.3 製造技術

常伝導加速管は，高い共振周波数精度が要求されるため，要求加工寸法精度が非常に厳しく，以下の製造技術を適用している。(図4)

(1) 表面粗度 0.1μm，寸法誤差 2～3μm 以下を実現する超精密切削加工技術

(2) 国内最大級の真空ろう付け炉(対応最大ワーク:直径 1.2m×高さ 3m)を用いた低ひずみの多段ろう付け技術及び異材ろう付け技術

(3) 広範な周波数帯域(300MHz～12GHz)における精密周波数測定・調整技術

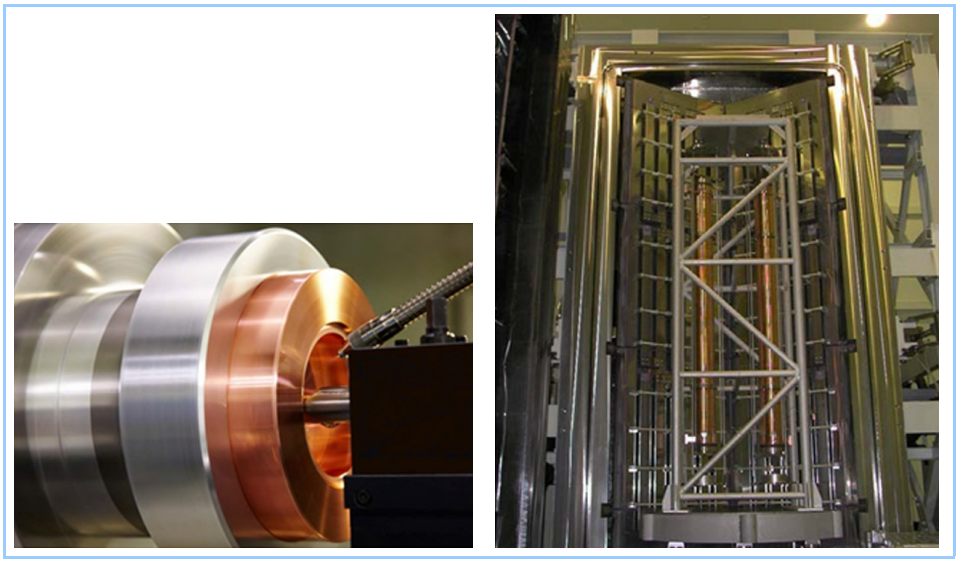

図4 超精密切削加工中の加速管部品(写真左)と真空ろう付け炉(写真右)

3. 高精度放射線治療装置 Vero4DRT

3.1 特徴

Vero4DRT(販売名 線形加速器システム MHI-TM2000)は，照射技術と画像技術を高度に統合化することを想定してシステム開発された画像誘導型の高精度放射線治療装置である。呼吸などによって動く腫瘍に対する照射技術(動体追尾照射機能)の実現を目指して装置構造や各種搭載機器が設計されている点が他の装置にない大きな特徴である。

本装置では，当社が開発した治療用X線を照射する超小型Cバンド定在波型加速管(従来サイズ比 1/3，世界で初めて治療装置に採用)と，X線を腫瘍形状に整形するマルチリーフコリメータ(MLC)などから成る“照射ヘッド”が首振り可能なジンバル機構に搭載されており，照射位置の微小なずれの補正や，呼吸などで動く腫瘍に対する追尾照射を可能としている。

3.2 適用先

Vero4DRT は現在までに，国内外の 18 施設以上の病院に納入されており，がん治療において多数の臨床実績を上げている。

3.3 製造技術と構造，機能

放射線治療装置では，正常細胞を避け，がん患部へ放射線を集中させる照準精度が治療の精度につながるため，患部と照射範囲において精密位置合わせが必要とされる。業界トップクラスの±0.1mm の機械精度を実現するために，当社が製品開発で培ってきた，(1) 工作機械における微小位置決め技術，(2) 印刷機械における画像処理技術，(3) 製鉄機械に用いられるシステム制御技術，(4) X線発生のための超小型加速管技術，などの要素技術が複合的に適用されている。

装置は，直径約 3.3m の高い剛性を持つOリング型の構造体(ガントリ)，首振り機構(ジンバル)に搭載された照射ヘッド，直交2対のX線イメージング装置(kV X 線源とフラットパネルディテクタ)，5軸可動の患者寝台(カウチ)を装備した構成となっている(図5)。

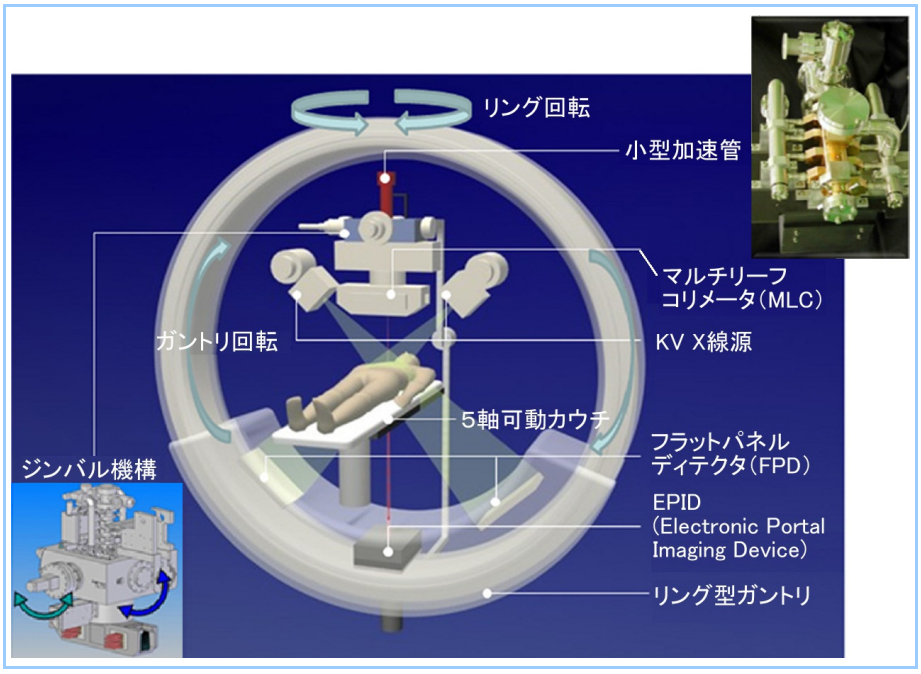

図5　Vero4DRT の装置構成

画像誘導型放射線治療では，イメージング装置を回転するガントリに搭載することで，任意の位置から腫瘍を立体的に捉え，正確な位置合わせを迅速に行うことができる。また，ガントリが旋回するという，従来装置では実現できなかった機械動作により，カウチを動かさない非平面照射が可能で，従来装置におけるカウチ旋回時の患者への負担を軽減するとともに，患者の位置ずれを排除できるため，高精度照射に必須の患者位置合わせ精度が維持できる。現在，この画期的なガントリ旋回技術を使った新しい治療技法の研究も進められている。

さらに，動体追尾照射機能では，イメージング装置で腫瘍の動きをリアルタイムに捉え，連動する照射ヘッドが首振り機能で腫瘍を追尾しながら強度変調放射線治療と組み合わせた照射を行うことができる(図6)。なお，この機能の開発は，総合科学技術会議により制度設計された最先端研究開発支援プログラムにより，(独) 日本学術振興会を通して助成を受けて取り組んできたもので，京都大学及び先端医療センターより医療面の支援を受けている。

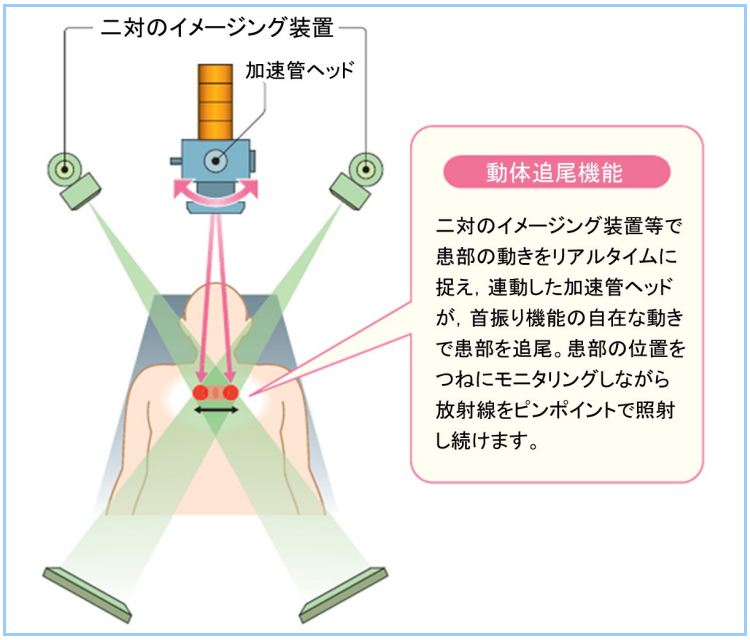

図6　動体追尾機能の概念図