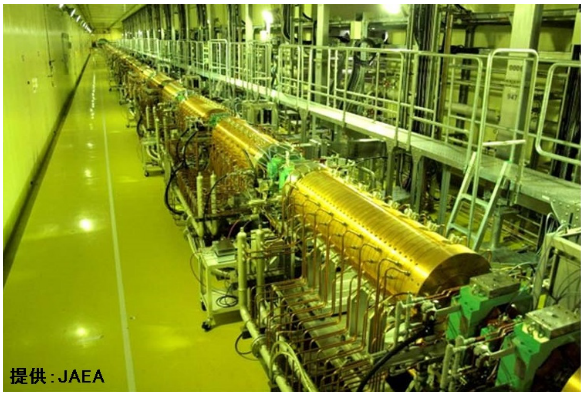
三菱重工の常伝導/超伝導加速空洞 －最先端加速器システムの開発に貢献－

Mitsubishi Heavy Industries' Normal Conducting / Superconducting Accelerating Cavities
- to contribute to the development of the most advanced particle accelerator systems -



三 菱 重 工 メカトロシステムズ(株) ※1
機 械 装 置 事 業 部 機 械 技 術 部

2014 年初めに国内の最先端加速器プロジェクトで相次ぎビーム加速が実証された。ひとつは東海村にある J-PARC※2 のリニアックエネルギー増強であり，加速空洞に加速電場の軸対称性に優れる ACS 空洞※3 を採用し，世界初の陽子ビーム加速，営業運転が開始された。もうひとつは，つくば市にある高エネルギー加速器研究機構の KEK-cERL※4 プロジェクトで，高加速電界での連続運転が可能な超伝導加速空洞を採用し，加速された電子ビームのエネルギーを回収し再利用することで高品質なビームを実現する新しい方式のリニアックの技術検証運転が行われた。上記の両プロジェクトにおいて，三菱重工業(株)（以下，MHI）は空洞開発及び実機製作を担当し，客先要求値以上の高加速電界を実現した。

※1：2015 年 10 月 1 日，MHI の加速器事業について三菱重工メカトロシステムズ(株)が承継し，現在，事業展開している。
※2：J-PARC は Japan Proton Accelerator Research Complex の略で茨城県東海村にある陽子加速器群の呼称。
※3：ACS 空洞は Annular-ring Coupled Structure の略。
※4：cERL は Compact Energy Recovery Linac の略。

1. J-PARC リニアックエネルギー増強/ACS 空洞

1.1 J-PARC リニアックエネルギー増強の概要

J-PARC は日本原子力研究開発機構と高エネルギー加速器研究機構とが共同で茨城県東海村に建設した陽子加速器群および実験施設群である。この施設では世界最高レベルの強さの陽子ビームを標的に当て発生させた様々な二次粒子（中性子，中間子，ミュオン，ニュートリノなど）のビームを使って物質科学，生命科学，素粒子物理及び原子核物理など幅広い分野の最先端研究が行われている。2008 年に第一期施設が完成し，2013 年～2014 年にかけビームの高出力化のため，リニアックのエネルギーを 181MeV から 400MeV まで増強した。

1.2 ACS 空洞

J-PARC リニアックは平均ビーム電流が 0.333mA と大きく，加速途中のビームロスは機器の放射化を招く。このためリニアックエネルギー増強にあたり，空洞内電界成分のうちビーム軸に垂直な成分（ビームロスに寄与）が無視できるほど小さく，軸対称性に優れる ACS 空洞が採用された。ACS 空洞の主要諸元を表1に，また図1に ACS 空洞セル形状とモジュール外観を示す。ACS 空洞モジュールは，加速空洞2タンクと陽子を加速するための大電力マイクロ波を加速空洞に分割，供給する橋絡空洞1タンクから構成される。全長約 2m の加速空洞は，両面全体を鏡面切削した無酸素銅製のセル（図1左参照，外径 φ430mm，板厚 50～60mm）を約 30 枚重ね合せた構造で，空洞内部を超高真空とするため，セル同士を微小な真空漏れもなきよう，真空ろう付けにて接合，一体化し製造される。MHI は，φ500mm の大口径にも対応できる超精密加工技術と大型真

空炉による接合技術，更に高周波測定技術とを組合せ，量産性・品質安定性の高い製品を供給した。製作した全 25 モジュールは 2013 年夏からビームラインに精密設置され，加速モジュール(21 台)とバンチャーモジュール(2 台)については約 120m にわたって数百ミクロンの精度で設置された。その後，コンディショニングとビーム試験を経て 2014 年1月に 400MeV ビーム加速を確認し，現在営業運転に供されている。

表1　各加速空洞の主要諸元

	ACS 空洞(常伝導空洞)	cERL 入射空洞(超伝導空洞)	cERL 主空洞(超伝導空洞)
加速周波数	972MHz	1 300MHz	1 300MHz
加速勾配	4.1MV/m(設計値) 4.5MV/m(到達値)	15MV/m(設計値)， 30MV/m(到達値)	20MV/m(設計値)， 25MV/m(到達値)
Q値	17 000～20 000	2.0×10^{10}	1.0×10^{10}@15MV/m
空洞材質	無酸素銅	純ニオブ	純ニオブ
モジュール構成	2×17 セル:加速モジュール (2×5 セル:バンチャーモジュール) (2×6 セル:デバンチャー1 モジュール) (2×9 セル:デバンチャー2 モジュール)	3×2セル/モジュール	2×9セル/モジュール
製作数	25(含むバンチャー，デバンチャー)	1	1

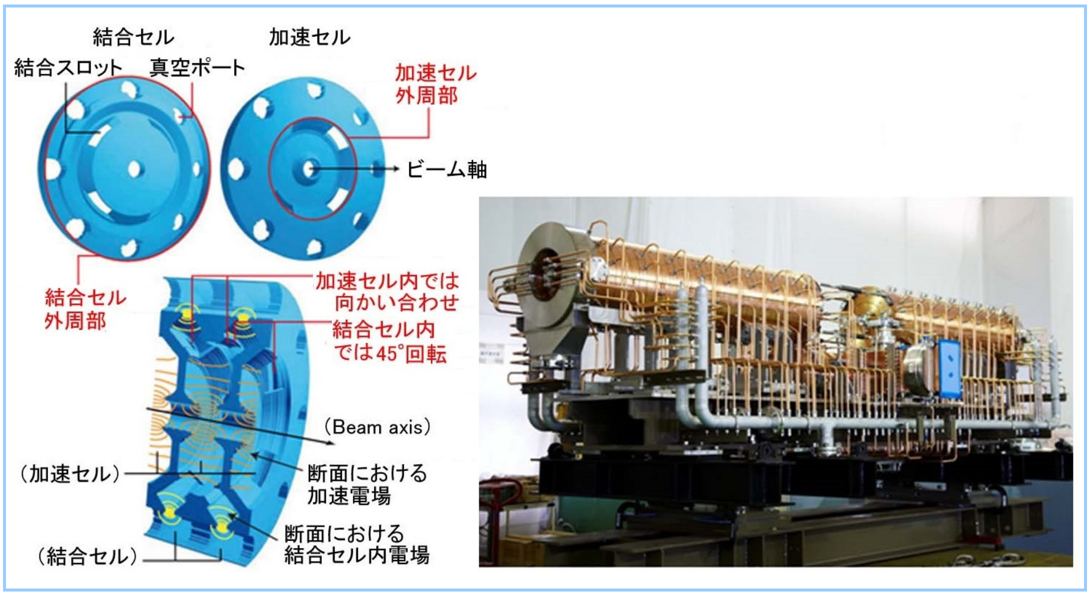


図1　ACS 空洞セル形状(左)及びモジュール外観(右)　※左図提供:JAEA

2. KEK-cERL/超伝導加速空洞

2.1　KEK-cERL の概要

KEK-cERL は，高エネルギー加速器研究機構内に建設された，エネルギー回収型ライナック(Energy Recovery Linac)計画の実証試験を行う放射光施設である。放射光は，電子などの荷電粒子の円周軌道の接線方向に放射される電磁波のことを言い，物質科学・生命科学の分野において，分子・原子スケールの世界を観察することに利用されている。ERL は，より精密な構造・より早い反応を観察できる放射光を提供することを目的とする施設である。従来の放射光施設では，加速器内を電子が何周も周回する内に放射光がぼやけてしまうが，ERL では電子を1周周回させる度に廃棄することで，常に質の高い放射光が得られる特徴を持つ。また，電子を廃棄する前に，電子がもつエネルギーを回収し，次の電子を加速させるエネルギーに再利用することが最大の特徴であり，“エネルギー回収型”と呼ばれる所以である。KEK-cERL は，3.5MeV～200MeV 程度のエネルギーで運転する小型加速器であり，3GeV クラスのエネルギーが必要とされる ERL に向けて，技術開発が行われている。

2.2 超伝導加速空洞の適用先

電子を加速器施設内で周回させて放射光を発生させる為に，電界を発生させて電子に電気エネルギーを与える，すなわち“加速”させる装置が加速空洞である。KEK-cERL では，超伝導現象を利用し，電気抵抗を限りなくゼロに近づけることで，小さな電力で高加速電界を連続して発生させることが可能な超伝導加速空洞が採用され，入射部（前段加速部）の3台，主加速部の2台に，MHI 製作の超伝導加速空洞が導入された。空洞の主要諸元を表1に，また図2に cERL 全体図を示す。

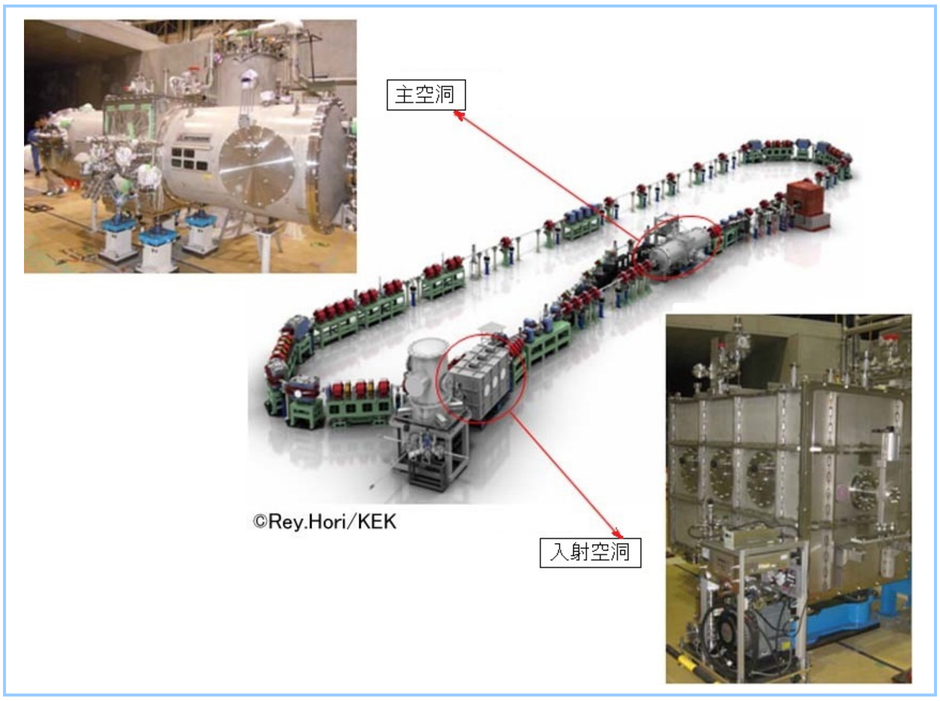


図2 cERL 全体図および MHI 製作部分

2.3 超伝導加速空洞の特徴

cERL 用超伝導加速空洞は，板厚 3mm，直径 300mm の高純度ニオブ材を直径 200mm の椀状に成形し，溶接連結することで形成される。図3に入射空洞および主空洞の外観を示す。超伝導加速空洞を製造する上で，ニオブ薄板の高精度成形技術はもとより，溶接開先面の均一肉厚加工・清浄化処理，更にノンスパッター・平坦ビード溶接技術，高清浄度環境下での溶接組立技術が必要とされる。特に溶接品質の低下は，超伝導加速空洞の性能を制限する要因となる為，非常に重要な技術である。

社内に保有する電子ビーム溶接機，及び清浄度管理エリアを活用し，高い溶接品質を持つ超伝導加速空洞を供給することで，cERL の安定なビーム加速運転の実現に貢献した。また，cERL 用超伝導加速空洞の製造に際しては，高圧ガス保安法に基づく検査に合格した。

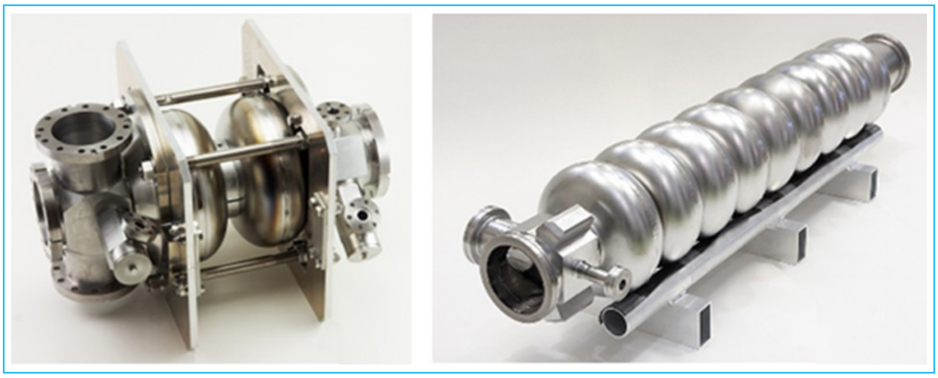


図3 cERL 入射空洞（左）及び主空洞（右）　　※写真（2 枚共）提供：KEK