

核融合実験装置・研究用加速器への取り組み

Hitachi's Activities in Fusion Device and Particle Accelerator Development

木戸 修一 Shuichi Kido

伊藤 裕 Yutaka Itou

仙波 智行 Tomoyuki Semba

山下 泰郎 Yasuo Yamashita



(a)

写真提供：独立行政法人日本原子力研究開発機構



(b)

写真提供：大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所



(c)

写真提供：独立行政法人理化学研究所



(d)

写真提供：独立行政法人日本原子力研究開発機構、
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構

図1 日立が納入した核融合・加速器分野の機器

独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) の臨界プラズマ試験装置 JT-60U の全景を (a) に、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (LHD) 真空容器内部を (b) に、独立行政法人理化学研究所の超伝導リングサイクロトロン (SRC) 全景を (c) に、および JAEA / 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の 50 GeV シンクロトロンを (d) にそれぞれ示す。

日立は、電気機器や超伝導・極低温機器そしてシステム技術など、総合電機メーカーとして培われた幅広い技術を駆使して、最先端技術が要求される核融合実験装置や基礎科学研究用の加速器の研究開発に継続的に取り組んでいる。

核融合分野では、国際熱核融合実験炉 (ITER) や国内次期装置である独立行政法人日本原子力研究開発機構 (JAEA) の JT-60SA 装置の設計検討や研究開発活動に協力するとともに、大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所 (NIFS) の大型ヘリカル装置 (LHD) などの性能向上のための改造に取り組んでいる。

加速器分野では、独立行政法人理化学研究所に超伝導リングサイクロトロン (SRC) 用セクター電磁石を、JAEA と大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 (KEK) 共同の大強度陽子加速器 (J-PARC) に約 400 台の各種大型電磁石などを納入した。

1. はじめに

新エネルギー源の有力な候補の一つとして研究が進められている核融合実験装置や、宇宙創生の謎に迫る基礎科学研究用加速器といった、国家プロジェクトとして推進される研究開発に日立が参加してから、すでに半世紀近くになる。この間、日立は、発電機や変圧器の製作によって培った電気機器製作の技術をベースに、各研究所・大学の指導の下、多数の研究用装置を製作、納入してきた(図1参照)。当初は実験室の試験機器程度であった装置も、今では発電プラントに匹敵するような規模になり、電気機器製作の基盤技術を超伝導・極低温技術、大型建造物の製作技術、超高真空技術、電磁解析技術などに発展させ、さらにシステム技術を組み合わせて、総合電機メーカーとしてこの分野の発展に貢献してきた。

ここでは、核融合・加速器分野における日立のこれまでの実績と最近の取り組みについて述べる。

2. 核融合実験装置への取り組み

2.1 核融合研究の発展

核融合とは、水素などの軽い原子核どうしが融合して、より重い原子核に変わることで大きなエネルギーを発生する反応であり、太陽エネルギーも核融合反応によって成り立っている。この核融合反応をエネルギー源として利用するために、物質の第4の状態であるプラズマを制御する試みが1950年代から世界各国で進められ、種々の型式の核融合実験装置が建設されてきた。近年では、次世代の核融合開発を国際協力によって行うITER (International Thermonuclear Experimental Reactor:国際熱核融合実験炉)¹⁾をフランスのカダラッシュに建設することが決まり、核融合研究の新たな一歩が踏み出されようとしている。

日立は、核融合研究の初期段階からこの分野に参加し、国内外の実験装置に対して、コイル・真空容器に代表される本体設備、およびNBI (Neutral Beam Injector:中性粒子入射加熱)装置、制御装置、電源システムといった機器を設計・製作してきた。

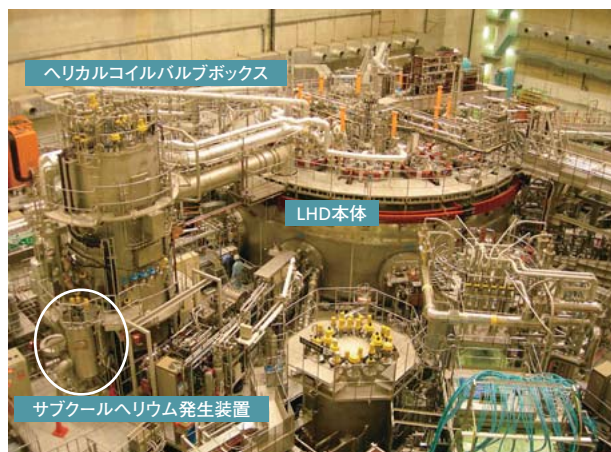
2.2 本体設備

日立はこれまで、国内の多くの核融合実験装置の本体設備を製作してきた(表1参照)。また、ITERの工学設計活動において実施された工学R&D (Research and Development)では、1997年に実機大真空容器セクターモデル、2000年にNb₃Alインサートコイルなどを製作し、開発に貢献するとともに技術を蓄積した。さらに装置の新規製作のほか、現在稼働中のLHD (Large Helical Device:大型ヘリカル装置)や

表1 日立の核融合実験装置

日立がこれまでに製作した核融合実験装置の本体設備の一例を示す。

| 完成年 | 顧客/装置名 | 仕様 | | 種別 |
|------|------------------------|------------|-----------|---------------|
| | | 主半径 (m) | 磁場 (T) | |
| 1972 | 日本原子力研究所(JAERI)/JFT-2 | 0.9 | 1.5 | トカマク |
| 1974 | 日本原子力研究所(JAERI)/JFT-2a | 0.6 | 1.0 | トカマク |
| 1976 | 名古屋大学/JIPP T-II | 0.91 | 3.0 | トカマク/ ヘリカル |
| 1978 | 東北大学/Asperator NP-3 | 0.8 | 0.5 | ヘリカル |
| 1980 | 京都大学/Heliotron-E | 2.2 | 2.0 | ヘリカル |
| 1980 | 日立製作所エネルギー研究所/HT-1 | 0.35 | 1.5 | トカマク |
| 1982 | 名古屋大学/NBT-1M | 1.4 | 1.7 | バンピー トラス |
| 1984 | 東京大学/REPUTE-1 | 0.82 | 0.3 | 逆転磁場 ピンチ |
| 1985 | 日本原子力研究所(JAERI)/JT-60 | 3.0 | 4.5 | トカマク |
| 1986 | 九州大学/TRIAM-1M | 0.8 | 8.0 | トカマク |
| 1987 | 日立製作所エネルギー研究所/HT-2 | 0.41 | 2.5 | トカマク |
| 1988 | 名古屋大学/CHS | 1.0 | 1.5 | ヘリカル |
| 1991 | 日本原子力研究所(JAERI)/JT-60U | 3.4 | 4.2 | トカマク |
| 1998 | 核融合科学研究所(NIFS)/LHD | 3.9 | 2.9 | ヘリカル |
| 1999 | 京都大学/Heliotron-J | 1.2 | 1.5 | ヘリカル |



注:略語説明 LHD (Large Helical Device)

図2 LHDヘリカルコイルサブクールヘリウム発生装置

超伝導ヘリカルコイルを冷やす液体ヘリウムの温度を、さらに下げるためのサブクールヘリウム発生装置を増設した(写真提供:大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所)。

Heliotron-Jといった装置に対しては、定期的な保守点検を実施しつつ、性能向上のための改造に取り組んでいる。

近年では、LHDの超伝導ヘリカルコイルに供給する液体ヘリウムの温度を下げるためのサブクールヘリウム発生装置を納入し(図2参照)、供給液体ヘリウム温度を4.4 Kから3.2 Kに下げること、発生磁場の約4%の増加を達成している²⁾。

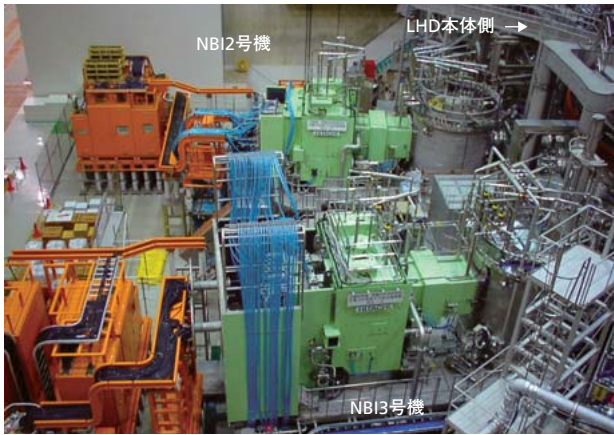
2.3 NBI装置

NBI装置は核融合実験装置内のプラズマに高速の中性粒子を入射することによって、プラズマを加熱するための装置である。日立のNBI開発は、1977年にJT-60用NBIの詳細設計に参画したことに始まる。1985年にはHeliotron-E用に30 kV 35 Aのバケット型イオン源など、その後のNBIで標準的に使用される多くのシステムを採用したNBIを3ユニット納入し、さらにビームエネルギー75 kV、入射パワー20 MW、パルス幅10 sと、当時としては世界最大のJT-60用NBIのビームライン14機を納入した。

1990年以降は次期大型装置用に要求される高エネルギー・高パワー・高効率化に対応するため、負イオン源や直流高電圧技術の開発に努め、1995年にJT-60U用、1998年と2000年にLHD用(図3参照)のNBIを納入している。

2.4 核融合実験装置の今後の展開

今後の核融合実験装置の建設予定としては、先に述べたITERのほか、そのサテライト実験装置としてJT-60Uを全超伝導化改造するJAEAの国内次期装置JT-60SA¹⁾がある。日立はこれまで培った技術を基に、これらの計画に協力していく予定である。



注:略語説明 NBI(Neutral Beam Injector)

図3 LHD用NBI

イオン源1台当たり負イオン電流40 A以上を安定して引き出すことができる(写真提供:大学共同利用機関法人自然科学研究機構核融合科学研究所)。

3. 研究用加速器への取り組み

3.1 加速器分野の発展

19世紀末から始まった原子核探求への興味は、1930年代のコッククロフトとウォルトンによる静電加速器、ローレンスらのサイクロトロン の発明など、各種の粒子加速器を生み出した。以来、加速器は先端科学の強力な研究ツールとして発展し、素粒子・宇宙・物質・生命科学の研究のほか、広く産業応用に普及して今日に至っている。

研究用加速器は、素粒子・宇宙・物質の起源を探るエネルギーフロントの高エネルギー加速器、大量の二次粒子を発生させて利用する大強度ビーム加速器、放射線利用促進研究用の加速器と多様である。日立は国内外の研究機関の計画に積極的に参加するとともに、医療・産業分野への応用にも取り組んでいる。研究用加速器に関する主な実績を図4に示し、以下に紹介する。

3.2 高エネルギー・核物理研究用

1960年代に入ると、国内でも大規模な加速器施設の開発が始まった。1971年に文部省高エネルギー物理学研究所(現在の大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)³⁾が発足し、日本初の本格的な大型加速器である陽子シンクロトロン の建設が開始され、偏向電磁石、四極電磁石を計110台納入した。次いでフォトンファクトリー用の各種電磁石やビームライン用機器、1980年代にはトリスタン用大型各種電磁石800台余りを製作し、高エネルギー加速器用常伝導電磁石の製作法を確立した。

一方で加速器用超伝導電磁石の開発も進め、トリスタン用のAMY検出器用ソレノイド、衝突点用QCS電磁石などを製作した。1984年に筑波大学に納入した超伝導ソレノイドは米国フェルミ研究所の大型国際共同研究CDF検出器に組み込まれ、1995年のトップクォークの検出につながった。さらに1990

| 計画(組織) | 1971年~ | 1981年~ | 1991年~ | 2001年~ | 2011年~ |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 陽子シンクロトン(KEK) | ■ | | | | |
| フォトンファクトリー(KEK) | | ■ | | | |
| トリスタン(KEK) | | ■ | | | |
| Super-ALIS(NTT) | | | ■ | | |
| HIMAC(放医研) | | ■ | | | |
| Spring-8(理研/原研) | | | ■ | | |
| KEKB(KEK) | | | ■ | | |
| W-MAST(WERC) | | | ■ | | |
| RIBF(理研) | | | | ■ | |
| J-PARC(JAEA/KEK) | | | | ■ | |
| STF(KEK) | | | | ■ | |
| ILC(KEK/国際協力) | | | | | ■ |

注:略語説明 KEK(大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)、Super-ALIS(Superconducting Atsugi Lithographic SOR)、NTT(日本電信電話株式会社)、HIMAC(Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)、放医研(放射線医学総合研究所)、SPRING-8(Super Photon Ring-8 GeV)、理研(理化学研究所)、原研(日本原子力研究所)、KEKB(KEK B-factory)、W-MAST(Wakasa-wan Energy Research Center Multipurpose Accelerator System with Synchrotron and Tandem)、WERC(財団法人若狭湾エネルギー研究センター)、RIBF(Radioisotope Beam Factory)、J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)、JAEA(独立行政法人日本原子力研究開発機構)、STF(Superconducting RF Test Facility)、ILC(International Linear Collider)

図4 研究用加速器の製作実績

国内の主要な研究用加速器建設に継続して取り組んでいる。

年代後半には、KEKB(KEK B-factory)用常伝導磁石を計712台、衝突点用QCS電磁石ほか各種機器を製作した。

また、重イオン加速用として、2003年に独立行政法人理化学研究所⁴⁾RI(Radioisotope)ビームファクトリー最終段のSRC(Superconducting Ring Cyclotron:超伝導リングサイクロトロン)用に全超伝導化したセクター電磁石を製作した⁵⁾。SRCは2006年12月にファーストビーム取り出しに成功し、稼動に至っている。

3.3 2次ビーム応用

1995年には理化学研究所Spring-8蓄積リング用の電磁石およびビームライン用の真空チャンバを製作し、大規模な真空システムも含めた経験を積んだ。2000年代に入ってからは大強度陽子加速器(J-PARC:Japan Proton Accelerator Research Complex)に取り組み、RFQ(Radio Frequency Quadrupole)のほか、3 GeVシンクロトン用と50 GeVシンクロトン用を合わせて416台の大型電磁石を製作した。また、リニアック用モジュラー電源、3 GeV電磁石用共振電源を担当した⁶⁾。J-PARCは2008年12月からビーム供用を開始している。

3.4 放射線利用研究

高速で運動する粒子の軌道が曲がる時に発生する高輝度の放射光を、基礎科学研究や産業応用の強力なツールとして利用するシンクロトンシステムの開発にも取り組んでいる



図5 多目的シンクロトロン・タンデム加速器システム
イオンビームを材料科学、生物、医療研究などに幅広く活用している(写真提供:財団法人若狭湾エネルギー研究センター(福井県))。



図6 先端加速器用超伝導空洞用クライオスタット
将来の高エネルギー加速器に向けた機器開発に取り組んでいる(写真提供:大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構)。

る。1988年に日本電信電話株式会社向けにSOR (Synchrotron Orbital Radiation)用超伝導加速器システム(Super-ALIS)を、1992年に現独立行政法人国立放射線医学総合研究所向けに電源・制御系も含めたシンクロトロンシステム(HIMAC)を製作した。さらに2000年には、福井県向けの多目的シンクロトロン・タンデム加速器システム(W-MAST)が完成した(図5参照)。また、これらの技術を応用し、ビームそのものをがん治療に利用する粒子線治療システムとして発展させている。

3.5 研究用加速器の今後の展望

2001年、KEKB加速器により、B中間子系におけるCP対称性の破れが実証され、これは2008年度の小林・益川両氏のノーベル物理学賞受賞へとつながった。21世紀に入り、素粒子物理学の分野は標準理論の更新に向けてかつてない高まりを見せており、現在、各国の協力により、国際リニアコライダー計画が始動している。また、放射光・RIビーム・中性子などの量子ビーム利用は、科学技術発展に欠かせないものとして、ますます重要となっている。これらを視野に入れた先端加速器の開発が日本でも始まる中、日立も取り組みを強化している。その一つとして開発中の超伝導空洞用クライオスタットを図6に示す。

4. おわりに

ここでは、核融合・加速器分野における日立のこれまでの実績と最近の取り組みについて述べた。

今後も引き続きプロジェクトに参加し、総合電機メーカーとしての重要な役割を果たしていくとともに、培った技術をさらに発展させて、粒子線治療システムやMRI (Magnetic Resonance Imaging:核磁気共鳴画像)用超伝導マグネットなど医療分野への応用も進めていく考えである。

参考文献など

- 1) 独立行政法人日本原子力研究開発機構 那珂核融合研究所, <http://www.naka.jaea.go.jp>
- 2) 核融合科学研究所ニュース 2007年8, 9月合併号, http://www.lhd.nifs.ac.jp/result/nifs_news/index_h3.html#2007
- 3) 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK), <http://www.kek.jp/ja/index.html>
- 4) 独立行政法人理化学研究所, <http://www.riken.go.jp/>
- 5) 木戸, 外:超伝導リングサイクロトロンセクター電磁石の完成, 日立評論, 90, 2, 170~173(2008.2)
- 6) 千田, 外:J-PARC(大強度陽子加速器施設)加速器建設への取り組み, 日立評論, 89, 2, 192~195(2007.2)

執筆者紹介



木戸 修一

1996年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 所属
現在, 核融合実験装置・超伝導応用機器の設計に従事
博士(工学)
プラズマ・核融合学会会員



仙波 智行

1989年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 所属
現在, 研究用加速器機器・超伝導応用機器の設計に従事
博士(工学)
日本加速器学会会員, 低温工学協会会員



伊藤 裕

1971年日立製作所入社, 電力グループ 日立事業所 医療・核装置生産本部 所属
現在, 加速器機器全般の開発に従事
技術士(原子力・放射線部門)
日本原子力学会会員, 日本加速器学会会員, プラズマ・核融合学会会員



山下 泰郎

1979年日立製作所入社, AE機器エンジニアリング株式会社 ビーム応用装置本部 所属
現在, ビーム応用機器全般の開発に従事
日本原子力学会会員