

話 題

ドイツ・重イオン研究所 GSI と国際協力加速器プロジェクト FAIR

杉田 圭*

GSI and International Accelerator Project FAIR

Kei SUGITA*

Abstract

An international accelerator complex FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) will be constructed at the site of GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, Germany. An overview of GSI and the status of FAIR project will be presented.

1. はじめに

ドイツの研究組織であるヘルムホルツ協会傘下の重イオン研究所 GSI (Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH) では、国際協力による加速器施設群 FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research in Europe) の建設が進められている。筆者は、2006 年より GSI で FAIR のための加速器用超伝導電磁石の設計・研究開発に携わっている。GSI と FAIR の紹介、現在の状況について報告する。

2. GSI

GSI^{†1} はドイツ南西部ヘッセン州のダルムシュタット北部にある重イオン加速器を擁する研究所である (図 1)。1969 年に設立され、現在、職員数は 1000 人ほどで、ドイツ連邦政府 (90%)、ヘッセン州 (8%) などの資金により運営されている。GSI には、線形加速器 UNILAC、重イオン・シンクロトロン SIS18、貯蔵リング ESR、さらにフラグメントセパレータ FRS などの加速器施設があり、原子核物理から生物物理、ナノテクノロジーなど、多岐にわたる研究を行っている。日本をはじめ世界各国から多くの研究者が訪れる。

これまでの GSI での研究成果として二つ、超重元素の発見とガン治療用加速器開発をご紹介します。

たい。元素周期表に載っている原子番号 107 番のボーリウムから 112 番のコペルニシウムまでの 6 つの元素は GSI で合成・発見された。その命名権は GSI に与えられ、それぞれ歴史的な物理学者や研究所の所在地であるヘッセン州 (108 番ハッシウム) やダルムシュタット (110 番ダームスタチウム) に因んだものとなっている。

ガン治療用の加速器開発は、生物物理グループとともに進められた。GSI で 1997 年から 2008 年まで炭素イオンビームを用いて 450 人の治療を行いその有効性を検証した後、ハイデルベルク



図 1 GSI・FAIR の位置

* GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Darmstadt, Germany
(E-mail: k.sugita@gsi.de)

^{†1} <http://www.gsi.de>

に治療に特化した加速器が建設された^{†2}。この治療施設は2つの通常の照射室に加え、世界初となる常伝導電磁石を用いたガントリー（総重量 670 ton）を備えた照射室があり、すでに患者を受け入れている。

3. FAIR

3.1 概要と国際協力の進め方

FAIR^{†3}は、GSIの既存の加速器を改良して入射器として利用し、後段に建設される重イオン・シンクロトロン SIS100 から取り出したビームを実験エリア、各ターゲット、さらに貯蔵リングなどへ供給し、様々な実験を並行して行うことができる複合加速器施設である¹⁾ (図2)。これまでと比べて、intensity は一次ビームで100から1000倍、二次ビームで10000倍、また重イオンのエネルギーで30倍が見込まれている。

建設計画は2001年にConceptual Design Reportにまとめられて提案され、2006年にFAIR Baseline Technical Reportを発表、2007年に公式にプロジェクトとして立ち上げられた。建設費は12億ユーロ（1600億円程度）と見積もられた。2010年にはGSI敷地内に会社組織FAIR GmbHが設立され、現在FAIRに参加する11カ国（ドイツ、フィンランド、フランス、インド、ポーランド、ルーマニア、ロシア、スロヴェニア、スペイン、スウェーデン、英国）が、その

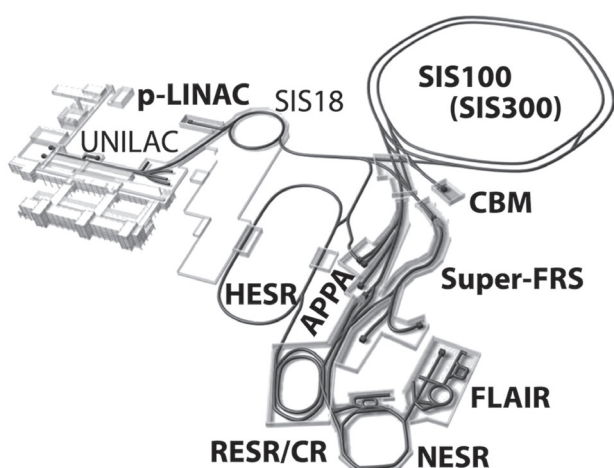


図2 GSI と FAIR の加速器・実験施設。太字が新たに建設されるもの。

Shareholder となり主にプロジェクトの管理業務などを行っている。

FAIR GmbH は加速器建設のための国際的な枠組み作りなどを進める一方、GSI は既存の加速器を使った研究と、FAIR 加速器のための研究開発を並行して進めてきた。今後はGSIの総力をあげて既存の加速器のアップグレードを含むFAIRの建設期に臨む必要があり、近い将来にFAIRとGSIの会社組織が合併する方向で検討されている。

プロジェクトの立ち上げにあたり2005年に建設費をまとめたコストブックが作製された。これは加速器の全設備・装置などが細分化されて、項目ごとの見積もりが記されたものである。その項目をワークパッケージ(WP)として、ある程度まとめ、参加国がそれぞれ貢献したいWPを選択し、必要な研究開発を含め現物支給(In-kind)でFAIRに貢献するという方式が提案された。また参加国が合意した金額をFAIRに出資するという方法での貢献もあり、In-kindでの貢献の表明がなかったWPについては、FAIR GmbHが入札を行い調達する。コストブックの見積もりと現実的な額との乖離や、必要なR&Dを引き受けなければならないことなどから、後者の方式を採用する参加国も少なくない。

またプロジェクトの透明性を高め、効率化するために、全WPの進捗状況や予算の執行状況などを包括的に把握・管理するプロジェクト管理ソフトが導入されている。GSIの各WPの責任者は各マイルストーンの設定を含め、WPのタスク完了までのスケジュールを入力する。それらをまとめて、プロジェクト管理部門が、WP間の依存性や人的資源の配分などを考慮した最適化を行うことになっている。

こういった大型加速器建設に当たっての国際協力の進め方やプロジェクト管理の方法は、今後、ILCなどを進める上で参考になると思われる。

3.2 加速器施設

限られた人的資源・予算を効率的に運用するために、2009年からは、FAIRの加速器施設をいくつかのモジュールに分け優先順位をつけて、開発・建設を推進することになった。現在はモジュール0から3までをスタートバージョンとして、集中的に進めている。各モジュールの概要を表1に

^{†2} <http://www.klinikum.uni-heidelberg.de>

^{†3} <http://www.fair-center.eu>

表 1 FAIR 加速器建設のモジュール化

No.	加速器	関連する実験	
スタート バー ジ ョ ン	0	SIS100 (既存の加速器との接続を含む)	全実験
	1	SIS100 実験エリア	HADES/CBM, APPA
	2	Super-FRS	NUSTAR
	3	高エネルギー反陽子 (p-Linac, pbar-target, CR, HESR)	PANDA, NUSTAR
	4	低エネルギー RIB・低エネルギー反陽子 (NESR, FLAIR)	APPA, NUSTAR
5	RESR	NUSTAR, PANDA, APPA	

示す。モジュール 0 は FAIR の中核を担う SIS100 並びに既存の加速器との接続である。次に SIS100 からの一次ビームを利用する実験エリアが続く。モジュール 2 は超伝導電磁石を用いた Super-FRS, 3 は反陽子の intensity を上げるために新設される陽子に特化した線形加速器, 貯蔵リングの CR, HESR などが含まれている。これらのモジュールは同時進行で建設が進められ、並行して既存の加速器のアップグレードも行われている²⁾。

4. 重イオン・シンクロトロン SIS100

SIS100 は周長約 1 km の超伝導磁石を用いたシンクロトロンである³⁾。SIS とはドイツ語の重イオン・シンクロトロンを意味する Schwer-ionen-synchrotron という複合語からつけられた。SIS のあとに続く数字は、偏向磁石の磁場強度とビームの偏向半径を掛け合わせた magnetic rigidity を表している。たとえば既存の SIS18 は 18 Tm のビームまで加速することができる。J-PARC の MR の場合、magnetic rigidity は 30 GeV の場合で 98.3 Tm となり、ほぼ SIS100 と同じである。

SIS100 は六角形状をしており 6 つのセクターに分かれている (図 3)。後に超伝導シンクロトロン SIS300 を SIS100 の上部に設置するため、それを考慮したトンネルの設計となっている。また加速器用のトンネルの内周側に、電源などを設置する供給用のトンネルがある。冷凍設備は、2 つのセクターごとにある建物に収められる。

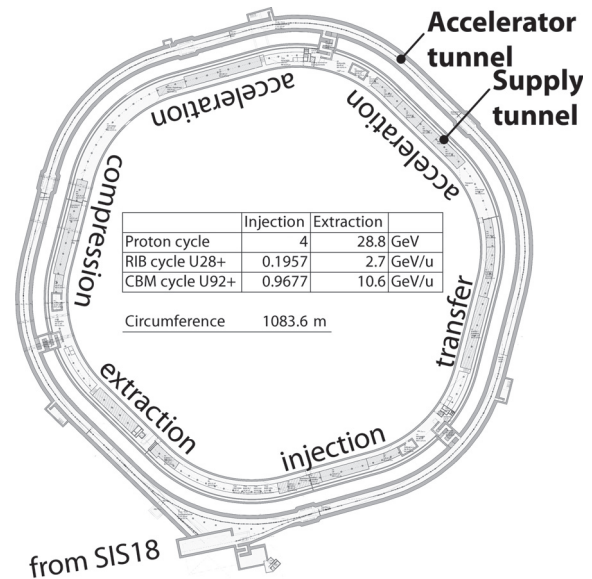


図 3 SIS100/300 トンネル。図中の表に主なサイクルでのエネルギー値を示した。

最後に、筆者が関わっている SIS100 の超伝導電磁石開発について述べる⁴⁾。偏向電磁石は、JINR (Joint Institute for Nuclear Research, ロシア) の加速器 Nuclotron に用いられた Superferric タイプのものを基本としている。GSI と JINR の共同研究により SIS100 用に最適設計を行い、ドイツの企業により 1 号機が製作された。試験のために約 28 kA/sec. に対応した電源、超伝導電流リードの開発も行われ、現在 GSI の低温施設で集中的に試験が行われている。この試験の結果を踏まえ、量産体制に入る。

集束・発散用の 2 つの四極電磁石は、クロマティシティ六極、水平/垂直ステアリング、多極補正などの各種電磁石や、ビームポジションモニタ、コリメータなどとともに、1 つのクライオスタットに収められ、ダブレットモジュールを成す。構成装置の組み合わせにより、全部で 10 タイプ以上のモジュールが存在する。各電磁石は GSI の設計に基づき、JINR で製作・試験され、GSI はダブレットの組み立て、その後の試験、トンネルへと搬入などを担当する。表 2 に電磁石の仕様、図 4 にマグネットの概観を示す。

表 2 SIS100 偏向 / 四極電磁石のパラメータ

	Dipole	Quadrupole
Number of magnets	108	166
Max. magnetic field	1.9 T	27 T/m
Current [kA]	13.093	10.512
Inductance [mH]	0.55	0.41
Max. ramp rate [kA/sec]	28	22
Length [m]	3.2	1.3

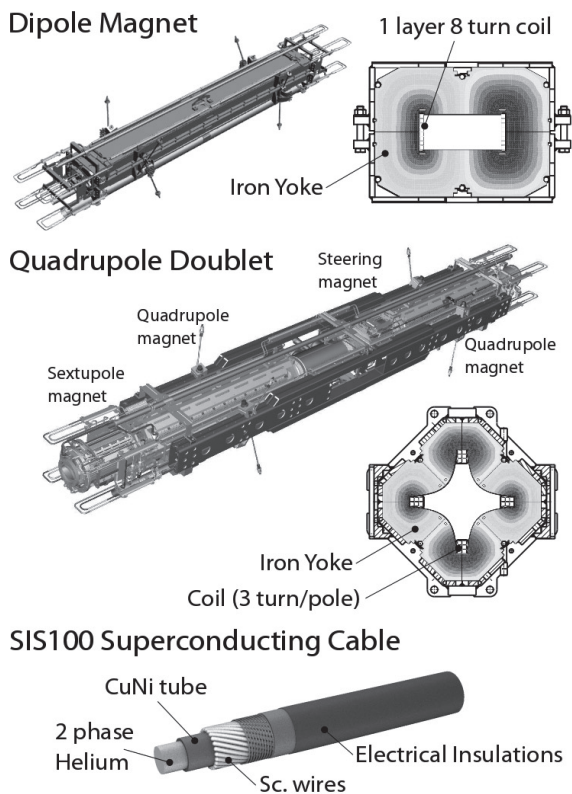


図 4 SIS100 偏向電磁石と四極電磁石ダブレット、及び Nuclotron タイプの超伝導ケーブル。

5. 今後の予定

先に述べた SIS100 の偏向電磁石や、Super-FRS 用の超伝導電磁石など、様々な加速器設備の調達が始まっている。また土木工事もすでに始まっており、トンネルを含む建物の建築許可もヘッセン州から与えられた。参加国との共同研究開発の難しさやプロジェクト管理など、国際協力による巨大プロジェクトならではの問題も多く抱えているが、2017 年末までに SIS100 の加速器設備をすべて所定の場所に設置し、電磁石の冷却、励磁を含むすべての試験を終え、2018 年からビームを使つてのコミッショニングが始まる予定である。

6. 最後に

FAIR プロジェクトの現状について報告した。加速器や実験施設が多岐にわたるため、それぞれの詳細については、参考文献などから辿って頂きたい。これからも進捗状況を報告していくつもりである。FAIR 建設のため（希望的には）多くの加速器関連の人事公募が見込まれるので、興味のある方は研究所のウェブサイト注目して頂きたい。

参考文献

- 1) FAIR Baseline Technical Report, GSI (2006).
- 2) O. Kester: Proc. of IPAC13, 1085 (2013).
- 3) P. Spiller et al.: Proc. of IPAC13, 3782 (2013).
- 4) E. Fischer et al.: IEEE Trans. on Appl. Supercond., submitted for publication (2014).