

S1-3b

ITER, JT-60SA用負イオン源に向けた負イオンの長パルス加速 Long pulse acceleration of negative ion beams for ITER and JT-60SA

小島有志、花田磨砂也、柏木美恵子、渡邊和弘、梅田尚孝、戸張博之、
吉田雅史、平塚淳一、市川雅浩、NB加熱開発グループ

Atsushi Kojima, the NB heating technology group

原子力機構
JAEA

はじめに

核融合発電の早期実証を目指して、国際協力による国際熱核融合実験炉(ITER)計画、日欧のBA活動によるJT-60SA計画が進められており、プラズマ加熱や電流駆動の主力である中性粒子入射装置(NBI)は、日本が調達を分担している。日本は、JT-60UやLHDにおいて、世界に先駆けて大電流・高エネルギー負イオン源を用いたNBIを実用化し、既にプラズマ実験に適用した実績を有している。これらの知見を基に、日本の負イオンコミュニティの協力を得て、ITER用に1MeV負イオン加速器及び1MV高電圧電源機器、JT-60SA用に500keV負イオン源によるNBIの開発に取り組んでいる。

JT-60SAやITERのNBI調達に向けては、NBIの心臓部である負イオン/ビーム源の開発が鍵であり、22~40Aの大電流負イオンを500keV~1MeVの高エネルギーに加速し、100~3600秒維持することが要求されている。本発表では、これらの負イオンビームを実現するための開発研究の中で、特に長パルスの負イオンビーム加速技術における課題及び進展につ

いて報告する。

長パルス負イオン加速の課題

JT-60SAやITERにおいては、長パルス負イオン加速器として、日本が提案した多孔多段型の静電加速器が採用されている。この加速器の特徴は、負イオン生成部から1080~1280個のビーム引出孔を通して大電流負イオンを引出し、3~5段の加速電極を通して500keV~1MeVまで多段加速することである(図1)。

しかし、JT-60U用負イオン源やITER用R&D加速器であるMeV級加速器において従来得られていた負イオンビームの性能は、340keV, 13A(70A/m²), 30s及び800keV, 140A/m², 0.2sであり、加速電極間で発生する絶縁破壊や、加速電極への熱負荷により、ビームエネルギーやパルス幅が制限されている事が大きな課題であった。そこで、実機JT-60SA用負イオン源やMeV級加速器を用いて、耐電圧の改善及び熱負荷低減のための研究開発を実施してきた。現在、MeV級加速器を用いて負イオンの長パルス加速の実証を目指した試験を継続中である。

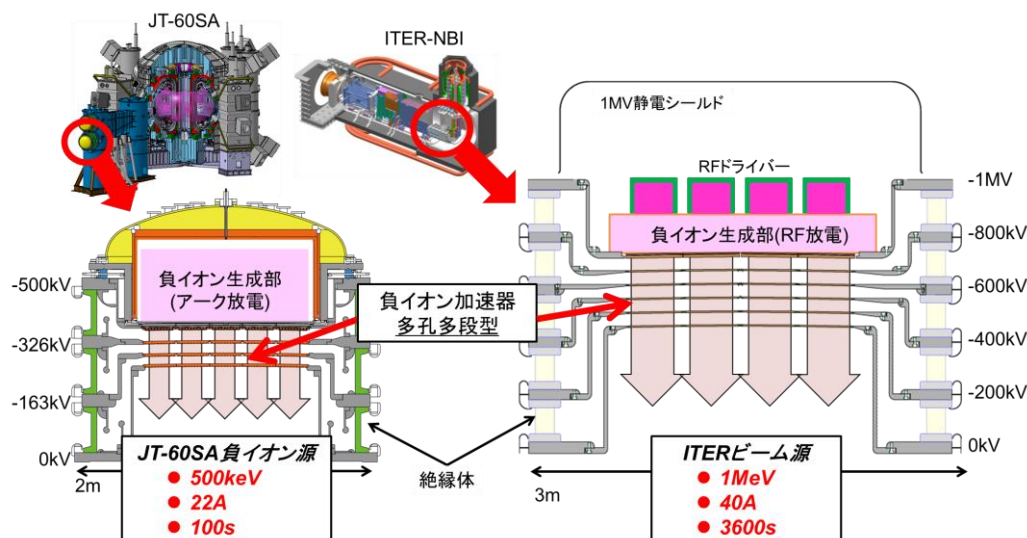


図 1. JT-60SA 用負イオン源及び ITER NBI 用ビーム源の概念図

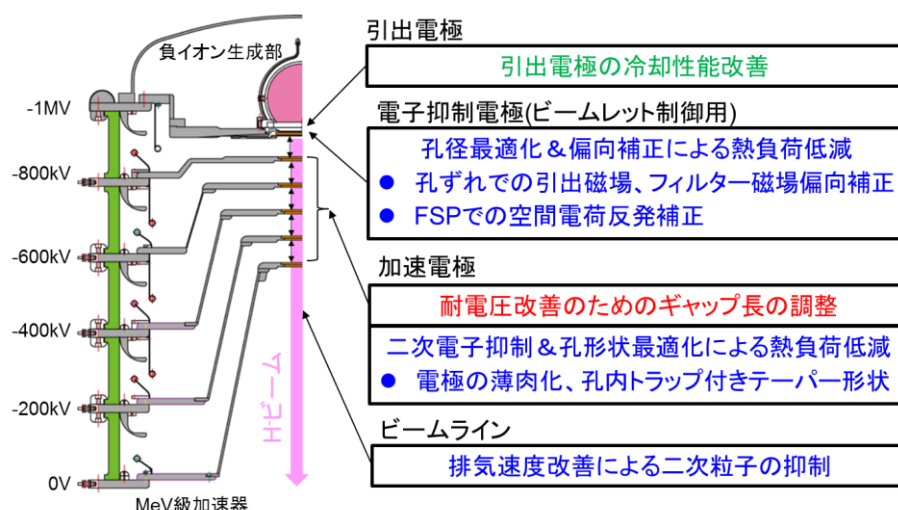


図 2. 長パルス負イオン加速に向けた開発項目

長パルス負イオン加速に向けた開発の進展

長パルスの負イオン加速を実現するため、これまでに開発した項目を図2に示す。

まず、加速器の最重要性能であるビームエネルギーを向上するためには、加速電極間で発生する絶縁破壊を抑制する事が本質的であった。そのため、加速器で利用する大面積多孔電極の耐電圧試験を実施し、絶縁破壊現象及び真空耐電圧の研究を行った。その結果、大面積多孔電極では、孔の回りに発生する局所高電界分布や、 2m^2 程度の広い電極表面積等、その電界分布を特徴づける孔数や面積の増加に従って耐電圧が低下する事が判明した。この結果に基づいて加速電極のギャップ長を調整したところ、これまで 800keV に制限されていたビームエネルギーを 1MeV に改善することができた。

そして、加速器の熱負荷を低減するためには、ビーム軌道の制御と熱除去が本質的であった。まず、加速器の入口である負イオン引出部では、負イオンと同時に引き出される電子を熱的に除去する必要がある。この電子は、引出電極に埋め込まれた磁石により偏向させて引出電極に衝突し、 $3\text{MW}/\text{m}^2$ 程度の高熱負荷を与える。そこで、冷却配管や磁石の位置・大きさを工夫し、この高熱負荷を定常的に除去できる高い冷却性能を持つ引出電極を開発した結果、長パルスの負イオン引出を実現することができた。

加速電極への熱負荷低減に向けては、各ビームレットの軌道を制御することが鍵であった。そのために、引出電極の直下に設けた電極の形状や位置を最適化し、引出電極の磁石や負イオン生成部からの磁場による偏向や、ビームレット間での空間電荷による反発を補正し、負イオンによる熱負荷の低減を図った。さらに、加速

途中の負イオンが、残留ガスや電極と衝突することにより生成される二次粒子を低減するために、加速電極の孔形状や加速器及びビームラインを含めた真空排気速度を改善し、二次粒子による熱負荷の低減も図った。これらの熱負荷低減策の結果、従来加速電力の23%であった熱負荷率が9%にまで低下し、ITER用加速器の設計値20%よりも低い熱負荷率が実現できた。

これら加速器全体に亘る改良を実施した結果、これまで 0.4s に制限されていた 1MeV ビームのパルス幅が100倍を伸長することに成功し、 45s に到達した。このパルス幅は、加速電極の温度時定数(~数秒)よりも十分長く、電極温度は定常状態に達していると考えられ、パルス幅の伸長に伴う長パルス加速性能の劣化は観測されていない。これらの結果、JT-60SAやITERに向けて、負イオンの長パルス加速技術の開発に見通しが得られた。

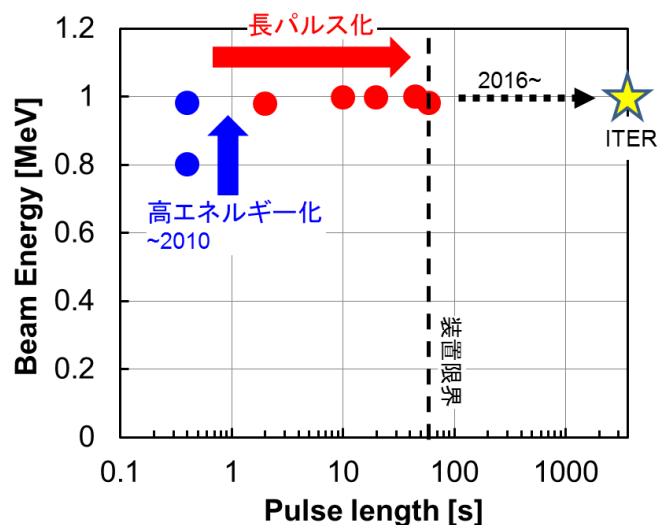


図 3. 長パルス負イオン加速の進展