

話 題

大型加速器施設用無停電電源としての熱電併給装置の実績と考察 — 理研 RIBF の CGS —

藤縄 雅*・矢野 安重

Operating Experiences on the Co-Generation System (CGS) as an Uninterruptible Power Source (UPS) for the Super-Sized Accelerator Facility, RIBF of RIKEN

Tadashi FUJINAWA* and Yasushige YANO

Abstract

The RI Beam Factory (RIBF) of RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science, which succeeded in extracting first beam on December 28th 2006 as scheduled, is currently conducting nuclear physics experiments. The RIBF has six accelerators, one of which is the world's biggest and most powerful superconducting ring cyclotron (SRC). The accelerators require not only a huge amount of electricity but also a reliable power supply for the He-cryogenic system, vacuum system and superconducting magnet systems. For this purpose, the co-generation system (CGS) was introduced. A gas turbine generates 6.5 MW of power from liquid natural gas (LNG) and supplies it to the systems mentioned above as an uninterruptible power source (UPS). By utilizing gas heat exhaust from the gas turbine, the CGS will also supply cooled water to the cooling system of the RIBF accelerators as well as to the air-conditioning system for the building. The CGS plant was completed on the 1st floor of the RIBF accelerator building and it began operating in April 2003. This paper covers the merits and demerits.

1. はじめに

世界最大規模の重イオンサイクロトロン施設として、理研 RI ビームファクトリー（以下 RIBF） 1 は、2006 年 12 月、超伝導リングサイクロトロン (SRC) から予定通り初ビーム取り出しに成功¹⁾、続いて超伝導 RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS) で RI ビームの初生成にも成功し、1997 年度に建設予算が認可されて以来 10 年にして実戦配備となった。その後、基幹実験設備の建設が始まり、まず超前方多機能超伝導スペクトロメータ (ZDS : Zero degree spectrometer) が BigRIPS の下流に整備されて本格実験が始まり、数十種類の新アイソトープの発見²⁾ 他、すでに多くの成果が報告されてきている。続いて 2010 年 3 月には、東京大学 CNS との共同プロジェクトである高分解能 RI ビームスペクトロメータ (SHARAQ) が運用を開始した。現在、RI・電子散乱装置 (SCRIT)³⁾ (軟 X 線放射光源としても利用可能)、超伝導多種粒子測定装置 (SAMURAI) 及び新入射器 (RILACII) (RILAC と独立に運転される)

の整備が進められている。

RIBF の熱電併給装置 Co-Generation System (以下 CGS) は、加速器施設の無停電電源 (以下 UPS) として、また、その冷却熱源として導入されたが、このような応用は、著者の知る限り世界的に例がない。さらに当 CGS (電気出力 6.5 MW) は民生用として、東京ガスパ管内で単機容量最大のみならず、埼玉県内最大規模である。

本装置も導入から 8 年が過ぎ、予定された成果すなわちメリットとデメリットが明確になり、改善点も多々明らかになったことで、今回報告する次第である。

2. CGS 導入の経緯と CGS 概論

CGS 導入の引き金は、環境対策である。理事会において RIBF 計画を説明した際、「世界一の加速器施設を作るのは良いが、京都議定書も話題になっているおり、電気と水を湯水の如く使うのはいかがなものか、環境問題にも留意すべき」との指摘を受けた。そこでこれを真摯に受けとめ、より省エネルギーでより高性能の

* 理研仁科センター RIKEN Nishina Center (E-mail: fujinawa@riken.jp)

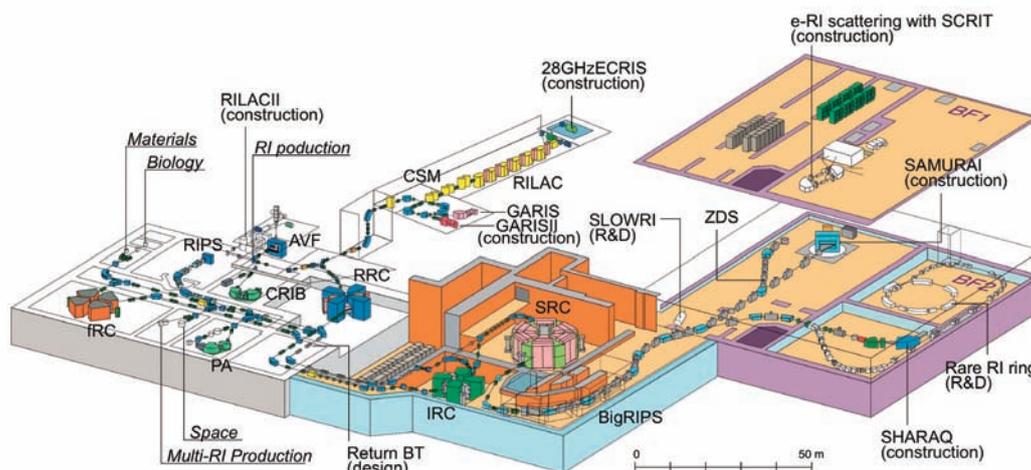


図1 RIBFの鳥瞰図. CGSはBigRIPS直上のRIBF加速器棟地上1階(15 m × 37 m)に設置されている. 左側の建物(白色の床部分)は旧加速器施設である.

加速器の考案に努めるとともに、これまでの商用電力一辺倒でない、より省エネルギーで環境に低負荷の新たなエネルギー源の採用についても検討することとなった。

エネルギー源の検討に当っては、当時発表された「新エネルギー利用等の促進に関する特別措置法」を参考にした。そこに挙げられている新エネルギー源でRIBFが建設される理研の和光事業所内で実現可能なものは天然ガスによる発電だけであった。例えば太陽電池や風力発電では後述する最低2 MWの電力は、この土地の面積、気象条件からして実現不可能である。

ということで、ガス会社から天然ガスを大量に買って自家発電をすると、環境性、経済性を考えて総合収支がどうか、吟味することになった。

加速器施設では加速器、実験装置の電力消費量がいちばん大きい、次に大きいのが屋内冷房である。電気を使って加速器を動かした結果生じる熱を、またまた電気で冷やすとはしゃくな話である。何かほかにもっと効率のいい方法はないものか。これが天然ガスCGS導入への最初の発想である。著者の知る加速器施設において、HIMACと兵庫県立粒子線治療センターでは、ガス冷房を採用し効率のよい冷房運転が行われている。そこで、RIBFにもガス冷房を採用して、熱源にガスタービン発電機(以下GTG)の高温排気ガスを再利用すれば、冷房を働かすと効率よく電気が同時に発生するという「夢のような話」になるのではないかと考えるに至り、具体化を検討することとなった。

次にCGSの種類と実績について説明する。

2.1 ボイラーと背圧タービン式CGS

CGSは、まず化学プラントや製紙工場向けに、ボイ

ラー(以下B)と背圧(蒸気)タービン発電機(以下TG)の組み合わせで発達した。この装置では、ボイラー(ガスの炎の温度は1,500℃)で15 MPa、530℃程度の加熱蒸気を作り、それを背圧タービン発電機で2 MPaまで断熱膨張させてタービンを回転して(仕事をさせて)電力にし、温度と圧力の下がった2 MPa、250℃程度の飽和蒸気を製造に必要なプロセス蒸気として使用するというものである。例として(株)鹿島南共同発電の500 t/h B × 2缶と70 MW TG × 2機が挙げられる。中東では、水電力省が海水淡水化に本方式を採用しており、大規模な例としてクエートDOHA WEST 8 × 300 MW BTG装置⁴⁾がある。

2.2 ガスタービン発電機(GTG)と廃熱利用式CGS

ガスタービン(GT)は、第二次大戦末期にすでに実用化されており、その後ジェットエンジンの発達と共に大型化高信頼性を得てきたものである。ちなみに日本最初のGTは旧海軍の試作魚雷艇用原動機として誕生した。(この試作機は、現在、東京電力「電気の資料館」に展示保存されている。)

前述の背圧タービンは効率を上げようとする熱力学の一般則からより高温の蒸気が必要で、高温にするためには高圧が必須条件である。しかしながら高圧容器に限界があるため現行では600℃程度が最高温度である。これに対し、GTでは燃焼による急激なガス膨張を直接タービンの駆動力とするので圧力容器の制限はなく燃焼ガスの温度(ノズルの耐熱性能)で効率がきまる。ちなみに日本製世界最高性能のM701H GTG(三菱重工高砂製作所製ガスタービン701系H型)では、タービン入口温度1,500℃を達成し、出力330 MWを得ている。GTGの排気ガス温度(約610℃)は十分に

高いため、廃熱を利用して蒸気を発生することは極めて簡単で、CGS としての総合効率が大幅に向上する。

著者は CGS の現状 (1999 年当時) と動向をみるため調査を行った結果、5 MW 級のほとんどは蒸気タービンとターボ冷凍機を組み合わせた方式ではあるが、最近では航空機転用 GTG (5 MW 級) と廃熱利用による CGS が、工場、地域冷暖房、テーマパーク他に採用されるようになってきているという情報を得た。この最近の実績とエネルギー変換効率のよさを踏まえて、RIBF では CGS を導入するならば、GTG と廃熱利用方式を採用することとした。(CGS には、GTG のほかにガスエンジンを原動機にしたものがある。ガスエンジンはその名の通り天然ガスを燃料とするレシプロエンジンであり、進歩的な地域のバスやゴミ収集車にも用いられている。発電効率は、GTG に比較して 40% 前後と高いが、廃熱の冷却水が 80°C 前後、排気ガスが 400°C 前後と電気効率が良い分、熱の供給が少なく、熱利用が難しい面がある。さらには、レシプロ運動を行うため、振動が大きいという問題がある。加速器は、ご存知のとおり振動を嫌う装置である。)

またこの調査では、CGS は UPS としては使われていないことも知った。例えば、長崎のハウステンボスは環境重視型施設として有名だが、雷害が予想される時は、運転員が CGS 母線を、予め商用母線より切り離し、雷雲が去るのを待つ運転を行っている。

肝心の環境面での CGS のご利益はというと、第一に CGS は、電気を使用する場所にあるので、送電ロス (一般に 5% といわれる) と変電所における変圧器の鉄損と銅損 (一般に変電所一箇所通過毎に 2% といわれる) が無視できるということである。これによって燃料の実使用電力への転換効率が上がり、実質的に環境負荷低減になっている。第二に火力発電所と比較して単位電気出力当りの CO₂ 排出ガス量が少ないということである。(仮に CGS で 6.5 MW を年中出力したとすると、火力発電所の CO₂ 排出ガス量を年間 1,100 t⁴⁾ 削減することに相当する。これは 220 ha の森林の CO₂ 吸収量になる。) また、近郊への SO₂ の排出量も無視できるほど少なく、NO_x は火力発電所の 1/3 程度しか排出されない。

3. UPS としての CGS

世界最大の超伝導サイクロトロン SRC と多数の超伝導 3 連 4 重極電磁石からなる BigRIPS は、長期シャットダウンを除き、それぞれ約 5,000 ℓ と約 4,000 ℓ の液体 He を常時貯留しており、液体 He プラントとしても RIBF は国内有数の規模である。

このような大型超伝導装置の安全な運転のためには、

突然の商用電力の停電や瞬時電圧低下 (以下瞬低) の対策を講じておく必要がある。

例えば He 圧縮機 (単機 315 kW を 3 機使用) が突然長時間停止すると、冷媒の循環が停止して最悪の場合クエンチにより He が大量に散逸してしまい、再励磁にかなりな時間を要する事態になりかねない。このような事態を回避するためには、落雷等突発の停電時に、なんらかの非常用発電機によって冷却系を含む全ての超伝導関連機器 (以下、重要負荷) を、速やかに再起動できるようにしておかねばならない。

理研和光事業所での過去の停電、瞬低の頻度を調べてみた。その結果、過去 14 年間に 6 回の 66 kV 母線の停電を経験しており、また、電圧低下 20% 以上の瞬低回数は 5 回/年⁵⁾ という統計データを得た。すなわち商用電力だけでは、年に何回かの停電または瞬低で超伝導装置の安全な運転に支障をきたすということである。

さてでは非常用電源としてどのような方式があるか。まず蓄電池と交流直流変換装置を備えた静止型無停電装置 (UPS) ではどうか。無停電にしておきたい重要負荷のうち He 圧縮機群だけでも 1 MW が必要で、小型冷凍機や、冷却系を加えると非常用電力は 2 MW 近くにもなるため、この UPS では経済的にも面積的にも成立しない。

より現実的な方式として大型 (2.5 MW 級) のジーゼルエンジン式非常用発電装置が検討された。しかし、この方式では停電感知、起動発電、給電の間に 最長でも 30 秒の許容できない時間差ができ、これでは全ての重要負荷が停止してしまう。

そこで、RIBF のような大規模超伝導加速器施設に特有の停電対策として CGS を商用電力回線に系統連携 (同期並列接続) させ商用回線停電時の UPS として活用する方式を計画立案することとなった。停電時に電力を維持するその他の重要負荷には、冷却系、真空系と制御系も含めた。

この方式を実現するためには、次の技術的な問題を解かなければならない。系統連携中の商用母線に事故が起きて無電圧となると、動作中の GTG は能力の数倍の負荷に対し給電を続けようとする結果、電圧低下と周波数低下に陥ってしまう。このような事故時に GTG を保護するため、GTG 母線を商用母線より瞬時に切り離す事が必要であった。切り離しがうまくいかないと最悪時にはタービン翼損傷やシアピン (Shear pin) (機械的ヒューズ。ピンが折れる事で本体を保護する。例えばモーターボートのスクリューとエンジンとの間の回転連結部分にある) 破断が起きたという事

故例が報告されている。これを防ぐために、上記ハウステンボスのような運用が必要となる。

さて、ではどうやって瞬時に回線を切り離すか。

一般の高圧遮断器 (VCB 等) では、操作機構にバネ動力を使用するため、瞬低検知から遮断までに3サイクルが必要であり、重要負荷保護には適さない。しかし幸い、**図2**に示す操作機構に電磁反発駆動方式を採用した超高速遮断器が、国内2社より発売された。これにより本遮断器とCGSとの組み合わせで、我々が望む無停電装置の構築が可能と判断し、詳細設計を行うこととなった。

すなわち、**図3**中の商用電力とGで表されたCGS母線の間、超高速遮断器 (52SRB2) を置き、商用電力が10%以上の瞬低を検知して遮断するまでに検知時間を含め1サイクル遮断を行う。商用母線と切り離す

ことにより重要負荷にCGS電力を無停電にて供給する。具体的には、①検出時間は8ms以下、②開極時間1ms、③アーク時間は、50Hz電圧電流の波高位置により異なり、6.6~9.9msとなる。その結果、遮断時間は合計18.9ms以下となる。

また、急激な電圧低下によって、定格の4倍(2200A)以上の過電流が発生した場合でも検知時間が短いため、最長で13.05msとなる。この間発電機には過負荷が、負荷には電圧低下が発生するが、時間が極めて短いため、感知できない間に高速遮断器が動作し、重要負荷のみにCGSが電力を供給する。

この時、CGSの最大電力供給能力は5.25MWであり、重要負荷総計は、2MW未満なので余裕がある。一方、CGSが系統連携中にトリップした場合は、商用電力より重要負荷に、これまた無停電にて給電される。

商用電力とCGSが、突然同時に電力を供給できない事態が発生する可能性は極めて低いと想定している。

BigRIPS, SHARAQとSAMURAI他には、再凝縮冷凍機と呼ばれる超伝導用小型冷凍機が多数あるが、これらは原則無停止としておきたいため、CGS母線点検時には商用母線より給電することで無停電化を図っている。このように、電力母線が二重化されているので、重要負荷に対しては、極めて信頼性の高い給電方式といえる。



図2 Super speed switchgear (図中左が超高速遮断器, 右が普通のVCB)。

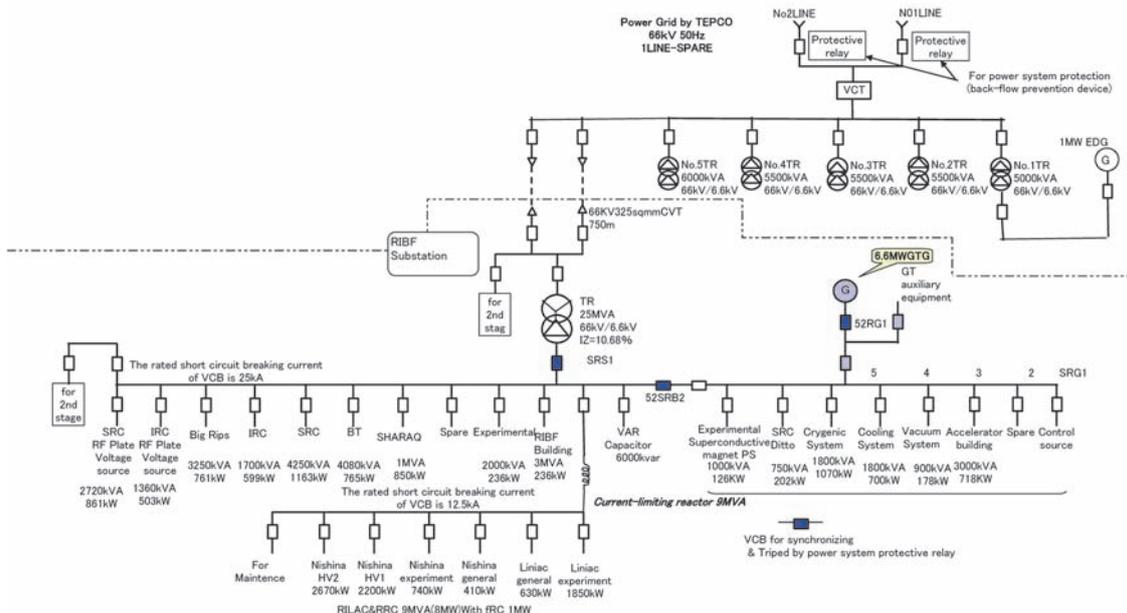


図3 RIBF施設の電力回線図。二重破線の上の部分は和光事業所全体の66kV受電設備とRIBF以外の6.6kV変電設備である。CGSはRIBF全体最大16MVAのうち最大7MVAをカバーできる。

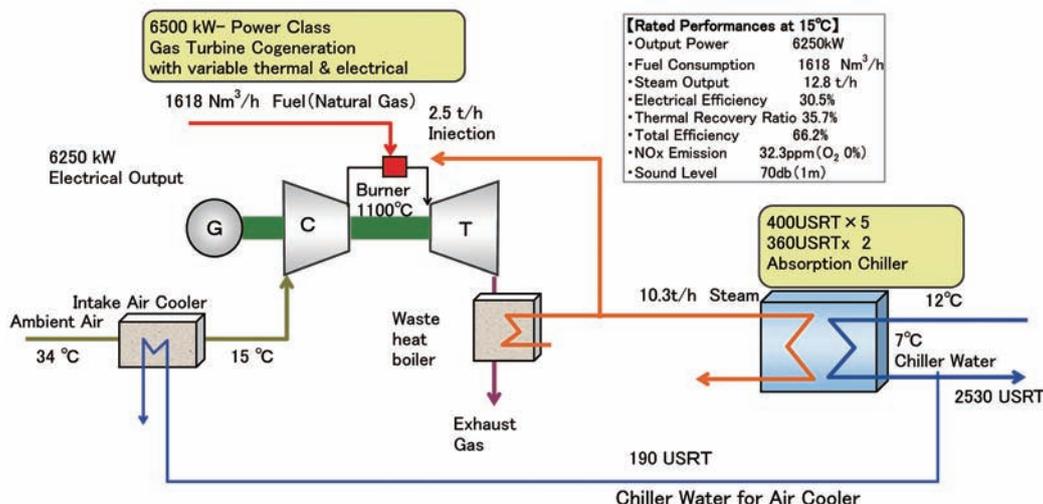


図 4 Diagram of CGS.

4. CGS の構成

図 4 に全体構成を示す。CGS の主機は、1 軸開放型ガスタービン発電機である。図 4 中 G は発電機を示し、C は空気圧縮機、T はタービンである。

ガス会社より供給される 0.8 MPa の中圧天然ガス燃料を、圧縮した空気を混合してバーナーで燃焼させる。バーナーから噴出する 1,100 °C の燃焼ガスは 480 °C まで断熱膨張してタービンと減速ギヤで結ばれた発電機を回転させて 5.25 MW の電気エネルギーを出力する。この熱機関をブレイトンサイクルと呼ぶ。GTG の出力は、吸気の密度すなわち温度に依存するため、夏季は吸気温度 34 °C を 15 °C まで下げる吸気冷却装置を備え、外気温 34 °C まで定格出力を維持できるように作られている。

図 5 にガスタービン本体を示す。吸気は圧縮され、燃焼器で燃焼し、燃焼ガスはタービンに回転力（仕事）を与えた後、480 °C の排気ガスとなって廃熱ボイラーに導かれる。

廃熱ボイラーに導かれた排気ガスは、その熱で 1 時間当たり 1.8 MPa/210 °C の飽和蒸気 13 t を作り出し、煙突から 160 °C にて排出される。この蒸気は吸収式冷凍機に導かれるが、屋内での熱負荷が少ない時は、その一部が毎時最大 8 t まで GTG の燃焼器に導かれ、再加熱されてタービンで断熱膨張することができ、さらに 1.25 MW の出力を得ることができる。これをランキンサイクルと呼ぶ。ただし、復水器がないため一般の火力発電よりは効率が劣る。すなわち、理研の CGS は今はやりのコンバインドサイクル（複合発電）の一種であり、吸気温度 15 °C の時、最大 6.5 (5.25+1.25) MW の電力を出力する。総合効率の観点からは、蒸気

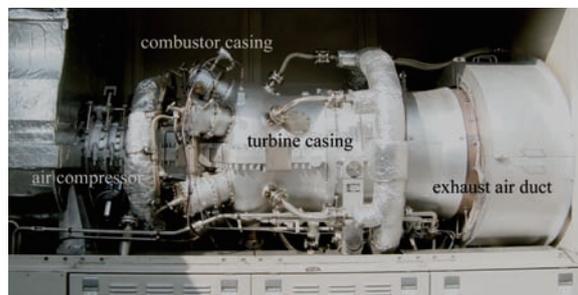


図 5 Gas turbine.

による電気出力向上よりも、冷凍機による利用のほうが高い。吸収式冷凍機（原理の説明は冷凍機の教科書に詳しいので省く）は、水の蒸発潜熱を利用して温水を冷却するもので、水分の吸収剤（LiB: 臭化リチウム）の再生に 0.8 MPa の飽和蒸気を使用している（「熱によって冷やす」というのはここがミソ）。RIBF では、400 USRT（1 USRT は冷凍能力 3.52 kW に相当する）5 台が RIBF 棟内加速器棟に、360 USRT 2 台が実験棟に設置され、7 °C の加速器装置冷却用冷水製造と空調用冷水の製造に用いられる。（吸着式冷凍機（Adsorbed Chiller）という冷凍機もある。廃熱（温排水）を利用して吸着剤のシリカゲルの乾燥に用いるもので、効率のよいシリカゲルの乾燥温度は約 80 度である。しかし、この温度は RIBF からの廃熱の直接利用としては中途半端であるため採用しなかった。）

吸収式冷凍機は、ターボ冷凍機他の圧縮機を用いる冷凍機に比べ、オゾン層破壊ガスや温暖化ガスを全く使用しないので環境性にも優れている。

ただし CGS 停止時にも冷凍機を動かすためには、補助ボイラーが必要で、天然ガス燃料の蒸気圧力 0.8 MPa、蒸気量 1.7 t/h の多管還流式ボイラーを 5 台用

意してある。

5. 運転実績と評価

CGS は、順調に運転を続けており 2011 年中に累積運転時間が 40,000 時間に届く予定である。

総合効率の実績としては、2010 年 6 月に 345 MeV/u の ^{48}Ca ビーム運転を行った際、最大電力負荷に近い連続運転であったことに加え、夏場で熱負荷が増大したため、総合効率 68.02% を記録した。これは火力発電の一般的効率である 40% や世界一の最新鋭複合発電 (MACC) (More Advanced Combined Cycle) の 59% に比較しても高効率といえよう。

CGS 導入後 2 回の停電を経験したが、計画通りの挙動を示した。最近では、2008 年 8 月に山梨県全域が終日停電した比較的大きな停電が和光地区にも及んだが、He 冷凍機の運転員が停電に気がつかない程順調に超高遮断器 (52SRB2) が作動し CGS-UPS に切り替わった。

瞬低は年 2 ~ 4 回発生しているが、CGS-UPS は全く問題なく対応している。ちなみに全国平均の年 5 回より少ないのは、日本最初の飛行場が所沢に選ばれた理由の一つに雷害が少ない点があり、和光市が所沢市の近傍であることも良い影響を与えていると思われる。

非常時への対応ではないが、商用電力が計画停電中にも、CGS の電力だけで旧加速器施設 (図 1 左側の建物) での実験を行うため、新施設の重要負荷を保持しつつ余剰の電力 (6.5 MW - 2 MW) を旧加速器施設に供給し、商用電力復電時に図 3 の主変圧器遮断器 SRS1 (TR 25 MVA の直下流) にて商用電力を同期併入して、無停電にて全系統を復電できることも実証した。

このように、本 CGS は熱電併給装置のみならず、極めて大型な UPS として十分に目的を果たしていると考えられる。

6. CGS の経済性

つぎに経済面ではどうかをみる。

6.1 154 kV 受電の代替として導入

RIBF の建設予算の立案にあたって、電力会社に受電設備の概算を打診したところ、使用予定電力が大きい (35 MVA。当初は MUSES とよばれていた蓄積冷却リング建設計画があった。MUSES の使命は、その後、SCRIT と Rare RI ring というより建設費とエネルギー消費の少ない実験方式の発明によって実現されることとなった) という理由で、現状の 66 kV 受電を 154 kV 受電に増強しないと電力の供給ができないという話が持ち上がり、新たに 154 kV 変電所を建設の上、154/66 kV の変圧器を複数設置し、66 kV での構内配電を行う

計画が立てられた。しかし、本計画には大面積の変電所用敷地と多額の建設費用が掛かる。それならば、いっその事、CGS を複数導入して 154 kV 変電所の建設を回避する方が、総合的に得策ではないかということになった。このいわば苦肉の策を練っているうち、どういわけか電力会社より、66 kV のままで必要電力量を供給するとの申し出があり、154 kV 変電所も 2 台目以降の CGS も不要となり、結局、過大な建設予算を要求する事態が回避できた。

CGS 導入により購入不要となった電気品の主なものは以下の通りである。

- ① 154 kV 変電所関係
- ② 超伝導保護用非常用発電機 2.5 MVA
- ③ 力率改善用コンデンサー 3 MVAR (同機は励磁電流を増加させると VAR を吸収し力率を改善する。CGS はそれ自体で 3 MVAR の能力を持つ。)

合計 22 億円余となる。

CGS 本体価格 (冷凍機含まず) は、予算規模で 8 億円程度であり、上記 22 億円に比較し、建設予算の大幅な削減が図れた。

6.2 CGS 導入による電気の基本料金等の軽減

電気の基本料金は、電気を使用する権利として使用と未使用に係わらず使用予定電力に対して毎月一定額 (1 kW 当り 1,533 円) を電力会社に支払うものである。GTG を起動するのに 150 kW の商用電力は必要なので、定格 6.5 MW のうち 150 kW を除いた 6.35 MW 分の基本料金 (年間 1.17 億円) が掛からなくなるという勘定になる。

さらに廃熱を利用する吸収式冷凍機では冷凍に電力がほとんど要らないので、基本料金の低減となる。RIBF の吸収式冷凍能力は、同じ冷凍能力をもつ電気式冷凍機の消費電力 2.72 MW に相当する (換算には COP = 3.52 (Coefficient of performance: 消費電力 1 kW 当たりの冷凍能力 kW を示す) とした) ことから、その額は、年間 5,060 万円となる。

CGS の導入により理研はガス会社の大口需要家となった。これによってガス単価が下がり、理研全体の既設設備のガス代金が年間約 2,400 万円軽減できたことも CGS 導入による実質的な経費軽減といえる。

以上を合計すると、年間約 1 億 9000 万円の経費軽減になる。

6.3 CGS 運転固定経費

CGS 保有に必要な固定経費として、運転員とボイラータービン (BT) 主任を合わせた人件費 (約 4,000 万円) が掛かる。この BT 主任は 5 MW 以上の容量を持つタービン発電機に必要な免許であり、経験のみで

発行される免許のため、資格者が少なく費用が発生する。固定費としては、他に、消耗品費（約 500 万円）、保守点検費（約 2,600 万円）及びガス基本料金（約 2,900 万円）の出費がある。

以上の運転経費の合計は、年間約 1 億円なので、固定費でみれば、CGS 導入によって年間約 9,000 万円の経費軽減となっている。

通例、電力会社と自家発電補給契約とか夏期操業特別契約を締結する。これらの契約においても、CGS の運用しだいでは、かなり大きな実質的固定経費節減がありうることを付記しておく。

6.4 ガス代と電気代

従量費として掛かるガス代も電気代も、単価が経済情勢によって変動するので、概略を記述するにとどめたい。

両者を比較すると、ガスは休日と夜間においては電力に対して競争力がない。昼間は、ある程度の冷房負荷があるときのみ競争力を持つ。このため、RIBF 運転時は、昼間は CGS の全出力運転、夜間は蒸気主電気従の運転を行っている。導入当初は、ガス単価が比較的安く、競争力があつたが、電力に比較して、LNG の価格上昇率が大きく年々競争力が低下している。

7. これまでの改善と今後の課題

RIBF の CGS は、運転開始より今日まで、数点の改良をして来た。時系列的には次の通りである。

(ア) 旧加速器施設への冷水供給：運転開始時は、RIBF の建設時期であり、熱負荷が大変少なく、発生蒸気をほとんど大気に放出していた。このため、旧加速器施設に冷水を供給することにより、旧式の電気式冷凍機合計 300 kW を停止した。これにより、年間 3,000 万円強の電気代を削減できた。また、冷水温度が 11 °C より 7 °C に下がったため、容量不足気味の旧施設の冷却能力が向上した。

(イ) 電気出力の向上：タービン翼の信頼性の改善によって、電気出力を 6.3 MW (吸気温度 18 °C 時) から 6.5 MW (15 °C 時) に向上した。

(ウ) RIBF 実験棟に蒸気を供給：実験棟 (図 1 右側奥の建物) には、375 USRT 吸収式冷凍機が 2 台設置されているが、CGS より RIBF 加速器棟経由の配管で蒸気を供給することにして、補助ボイラーは不要とした。これにより、補助ボイラーと煙突他の設備費用が削減され、かつ CGS の全体効率が向上した。

(エ) 停電時の旧加速器施設への給電：商用電力の停電時 (停電点検を含む) にも使用電力の少ない旧加速器施設で実験ができるようにするため、CGS より旧施設

に電力を供給し、商用電力復電時にも停電することなく、主変圧器の 6.6 kV 側 (図 3 SRS1) で同期投入できるように改造した。

以上が、主たるこれまでの改善項目である。

次に、今後改善すべき点について説明する。

ガス単価の電気料金との比較における上昇により、経済性競争力が低下している。これを改善するためには、一段の高効率化と出力向上が考えられるが、いずれも比較的少ない投資で可能である。結果として環境性も向上する。改善計画は次の通りである。

1) 蒸気発生量の増大：当 CGS の廃熱ボイラーは、定格では飽和蒸気 (1.8 MPa/210 °C) 16 t/h を作り出すことができるが、現在は 13 t/h となっている。これを定格の 16 t/h に少しでも近づけることで、さらに 350 USRT の冷凍能力を得ようというものである。具体案を以下に示す。

① 廃熱ボイラーへは 10 °C の井戸水を給水しているが、この給水の温度を加速器冷却水廃熱の再利用 (冷却塔で大気と熱交換せず、熱交換器で 10 °C の井戸水と熱交換させる) によって 30 °C まで上げる。8 t/h の井戸水を補給するとすれば、熱交換器で 160 Mcal/h を回収することになり、廃熱ボイラーの蒸気発生量を 0.2 t/h 増加させる。

② 廃熱ボイラーはボイラー水の水質確保のために、5% の連続ブローを行っている。この熱量 130 Mcal/h を給水に回収して、蒸気発生量を 0.16 t/h 増加させる。

③ 漏れ蒸気の回収。現在は配管等より 1 t/h 以上の行方不明蒸気がある。この漏れ蒸気を回収して廃熱ボイラーに戻す。

2) 蒸気圧力差の活用：廃熱ボイラーの発生蒸気圧は 1.8 MPa であるが、吸収式冷凍機の必要定格蒸気圧はより低圧の 0.8 MPa である。このため減圧弁にて圧力を下げて冷凍機に供給している。この減圧弁に替えて背圧タービンに代表される蒸気機関を置くとすると、約 120 kW/8t の動力を得ることができる。ただし当廃熱ボイラーは、電気事業法に準拠していないため、8 t を超える蒸気を発電に使うことはできない。そこで機械力として使うことになる。

対象として考えられるのは、GTG 用ガス圧縮機か He 圧縮機の動力の一部である。これによる電気代の軽減は、120kW 年 6500 時間ベースとすると、基本料金が年 220 万円、従量料金が年 1,000 万円で合計 1,220 万円となる。

3) 発電出力の増大：現 GTG の吸気温度を 7 °C まで下げることができれば、6.8 MW までの出力増強が可能である。ちなみに、発電機単体では、7 MW の能力

がある。このような定格を超える運転は、経済産業省の通達⁶⁾により法的に全く問題がない。

4) タービン温度上昇：2002年には高温限界といわれたタービン温度1,100℃も、燃焼器とタービンの改良によって2011年にはLNGの燃焼温度である1,600℃に近づきつつある。今後、この改良型のタービンが導入できれば、更なる効率の向上と蒸気量の増加が図れる。

5) 地域暖房：廃熱ボイラーの煙突からは、160℃の排気ガスが放出されている。十分に高い温度であるから、加速器冷却廃熱をこれで再加熱して、理研近隣の地域暖房熱源⁷⁾として活用することも将来の計画として考えたい。

8. ま と め

RIBFのCGSが成功裏に運用されているためか、和光市は、CGSの導入が盛んであり、人口比の台数及び容量は日本有数である(計9台, 7.2 MW)。

加速器施設におけるCGSは、先ず商用電力との組み合わせにおいて、電力の安定供給に優れる点あげられる。RIBFの場合は、超伝導電磁石があるため、その有効性が顕著である。また常伝導加速器施設においても、制御系はもとより、真空系、冷却系に導入すれば、雷害による停電や瞬低後の再起動が敏速に行えることになる。特に、医療用加速器は、人命にも影響を与えるため検討に値する。加速器以外でも、超伝導を用いる核融合研究施設や、発熱の大きなスーパーコンピュ

ターにも最適な設備と考える。

次に、経済性であるが、最初からCGSを導入することで計画すれば、多くの機器を省くことができることは説明した。さらに電力基本料金の節減や、既設ガス器具のガス単価の軽減も経済性検討の場合忘れてはならない項目である。

環境性であるが、これは、導入の第一目的でもあり、十分その目的は果たしている。即ち、加速器施設としてのポスト京都議定書に対する回答といえる。今後は、さらなる熱のカスケード利用を行い、高効率化へ導く余地があると考えられる。

最後に「夢のような話」は3.3 MWの冷凍能力を発揮すれば、同時に6.5 MWの電気が発生するということになる。

参考文献

- 1) 福西暢尚他：日本加速器学会誌 4巻2号 112 (2007)。
- 2) T. Ohnishi et al. : JPSJ, 77, 083201 (2008); JPSJ, 79, 073201 (2010)。
- 3) 若杉昌徳他：日本加速器学会誌 4巻4号 288 (2007)。
- 4) 藤縄雅他：日本大学生産工学部第16回学術講演会 2-16 61 (1983)。
- 5) 電気共同研究 第46巻 第3号「瞬時電圧低下対策」 P7 平成2年。
- 6) 経済産業省原子力安全・保安院：原院第1号 NISA-151C-01-1 平成13.12.05。
- 7) 北野大他：和光市地域新エネルギービジョン 和光市 66-69 平成18年2月。