

# 加速器施設に世界初の熱電併給装置(CGS)導入他

## THE WORLD'S FIRST CO-GENERATION SYSTEM FOR ACCELERATOR FACILITIES AND OTHERS

藤縄 雅#,<sup>A)</sup>,  
Tadashi Fujinawa #,<sup>A)</sup>,  
<sup>A)</sup> RIKEN Nishina Center

### Abstract

First of all, the author would like to thank all of his colleagues in receiving the Particle Accelerator Society of Japan's Award for Significant Contributions. In this paper, the co-generation system (CGS) in the RIBF (Radioactive Isotropy Beam Factory) RIKEN Nishina Center, which follows the measures of the Kyoto Protocol for global warming and black out in utility company is explained in detail. Furthermore, Following the CGS explanation the author will explain cables and cabling for the Heavy Ion Accelerator in Chiba, Hyogo Ion Beam Medical Center and RIBF. In addition, the cranes at RIBF are also detailed.

### 1. はじめに

私は、昭和 23 年(1948)生まれ、日本大学大学院修士課程を 1973 年に修了後、三菱電機に入社、海外電力案件を担当しました。平成元年に今回の受賞に関する推薦者の一人である、故平尾泰男先生にお会いして放医研の重粒子線がん治療装置(HIMAC)の建設に係わるまでは、加速器に関しては、「仁科先生のサイクロが占領軍により東京湾に捨てられた。」程度の知識しかありませんでした。その後兵庫県立「粒子線医療センター」(HIBMS)の建設を担当して完成後、次なる業務として図 1 に示す理研の RIBF を担当しました。その後理研に転籍、今日に至ります。今回加速器学会より「特別功労賞」を受賞して大変名誉な事と深く感謝すると共に、加速器の付帯設備等について解説させていただきます。

### 2. 理研仁科センターの熱電併給装置

#### 2.1 背景

今回の受賞タイトルともなっている、加速器施設に初

めて CGS (Co-generation system) [1]を導入した事について説明いたします。

推薦者の一人である、矢野安重先生が理事会において RIBF の建設計画を説明したところ、理事より「世界一の加速器施設の建設は、理研のお家芸でもあり当然である。しかしながら、京都議定書(1997 年)もあり、電気と水を湯水の如く使う事は如何なものか。物理学者であるから何か考える様に」との宿題をもらった。しばらくして、私がエネルギー変換を得意分野としている事を思い出し、新エネ省エネ案の検討を指示されました。

新エネの代表「太陽光」はエネルギー密度が少なく仁科記念棟の屋上一般に敷き詰めても数十 kW 程度の電力を得られるのみで、風力は必要風速が 6 m/秒に対して和光市の平均が 1 m/秒程度で話にならない。磁石や電源の冷却排水を利用して吸着式冷凍機も考えましたが温度が低すぎて機能しない事が判明しました。

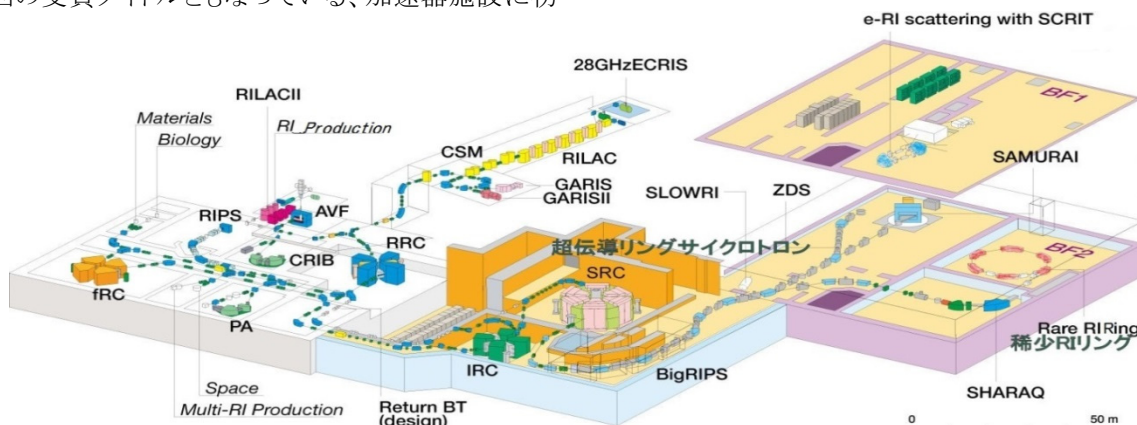


Figure 1: Bird's-eye view of RIKEN RIBF.

試行錯誤の末に著者は一つのアイデアが浮かびました。

それは、加速器は比較的多くの電力を消費するが、最終的には全て熱になる。この熱を取り除く為に電気を用いると、さらに消費電力が増加するという矛盾が生じる。HIMAC と HIBMS は冷凍機に吸収式冷凍機すなわちガス冷房を用いている。ここに着目し、ガス冷房の熱源にガスタービン(GT)の廃熱を利用して冷房のスイッチを入れると、まるで手品のように電気が発生する事となる。

当時は、ガスエンジンに RIBF に適合するものがなく、ピストンエンジンに比較して、タービンの方が振動が少ないと言うメリットがあった。

## 2.2 CGS システムと環境性

純国産の周囲温度 15°Cにおいて蒸気注入時出力 6.5 MW のガスタービン発電機(GTG)+廃熱ボイラー(WHB)と吸収式冷凍機 5 台(合計 2,720 USRT:米国冷凍トン)が入札の結果導入された。図 2 に CGS の系統図を示す。ガスタービンは吸气温度に出力が反比例する(冬に強く夏に弱い)為、吸气を冷却する装置を備えており気温 34°Cまでは定格を維持できる。そして気温が 12°C以下の場合には 6.6 MW で連続運転が可能である。さらには電気優先か冷凍機優先かの選択ができ、それぞれの負荷に応じた出力の選定が可能であり、タービンに蒸気を入れ出力を向上させての運転は、複合サイクル(CC)発電となる。

肝心の環境性であるが、先ず発電機本体が RIBF 内に在る為、一般に数%と言われる送電ロスが無視できる。

燃料は天然ガスを使用する為、CO2 発生量は単位重量当たり石炭の半分以下、石油の 6 割程度で、SOxはゼロ、NOxも 1/3 程度と極めて少ない上に、効率は石炭火力の 44%に対して、CGS は 68%を記録している。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為、環境性に優れている。

仮に、CGS で 6.5 MW で 1 年間運転した場合、火力発電所の平均 CO2 排出量換算で 1,100 トンを削減する事に相当する。これは、220 ha の森林の CO2 吸収量と同じである。

さらに、RIBF においては高効率電動機と高効率変圧器を積極的に導入しており一段の環境性向上に努めている。そして特別高圧の 66 kV の遮断器は温暖化ガス(SF6)を使用しない真空遮断器(VCB)を使用している。高圧遮断器も全て VCB であり、高圧/低圧変圧器は油を使用しない乾式モールドタイプを用いて環境に配慮している。この面からも理事会の宿題のみならず、京都議定書への十分な対応をしていると言える。

## 2.3 無停電電源装置としての CGS

さらに CGS を導入すると自前の電源を持つ事となり、東京電力(以下東電)停電時には、無停電でヘリウム冷凍機等の重要負荷に電力を供給する。この時の選択遮断の為の超高速遮断器は、停電感知から遮断までを 1 サイクル(1/50 秒)で行える優れたもので、停電した商用回線と重要負荷を切り離す事で、CGS の単独運転が可能となる。図 3 に単線図を示す。

また、何らかの理由で CGS が停止した場合は、無停電で商用回線より配電され続ける。

実際に、東電停電時にヘリウム冷却装置の運転員は停電に気が付かない程全て順調に運転を続けていた。CGS により自動的に保護される負荷は、冷凍機他に、冷却系、SRC と BigRIPS の超伝導電磁石、真空系、加速器棟の空調照明他の付帯設備、および制御系である。さらには、加速器の運転状況に応じて 2 MW 強の電力を選択し供給する事が出来る。

このように電源を二重化する事により、予期せぬ停電、計画停電のみならず、瞬時電圧低下(瞬低)にも十分対応でき 2003 年導入以来重大な問題もなく要負荷を守り続けている。

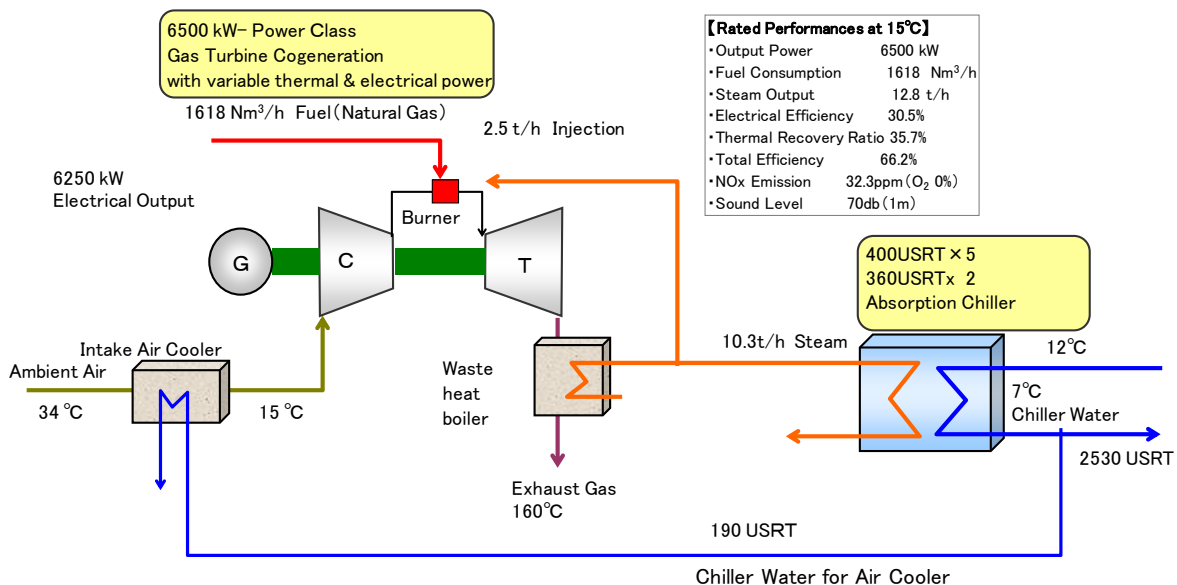


Figure 2: CGS follow diagram, G:Shows generator, C: compressor, T: turbine respectively.

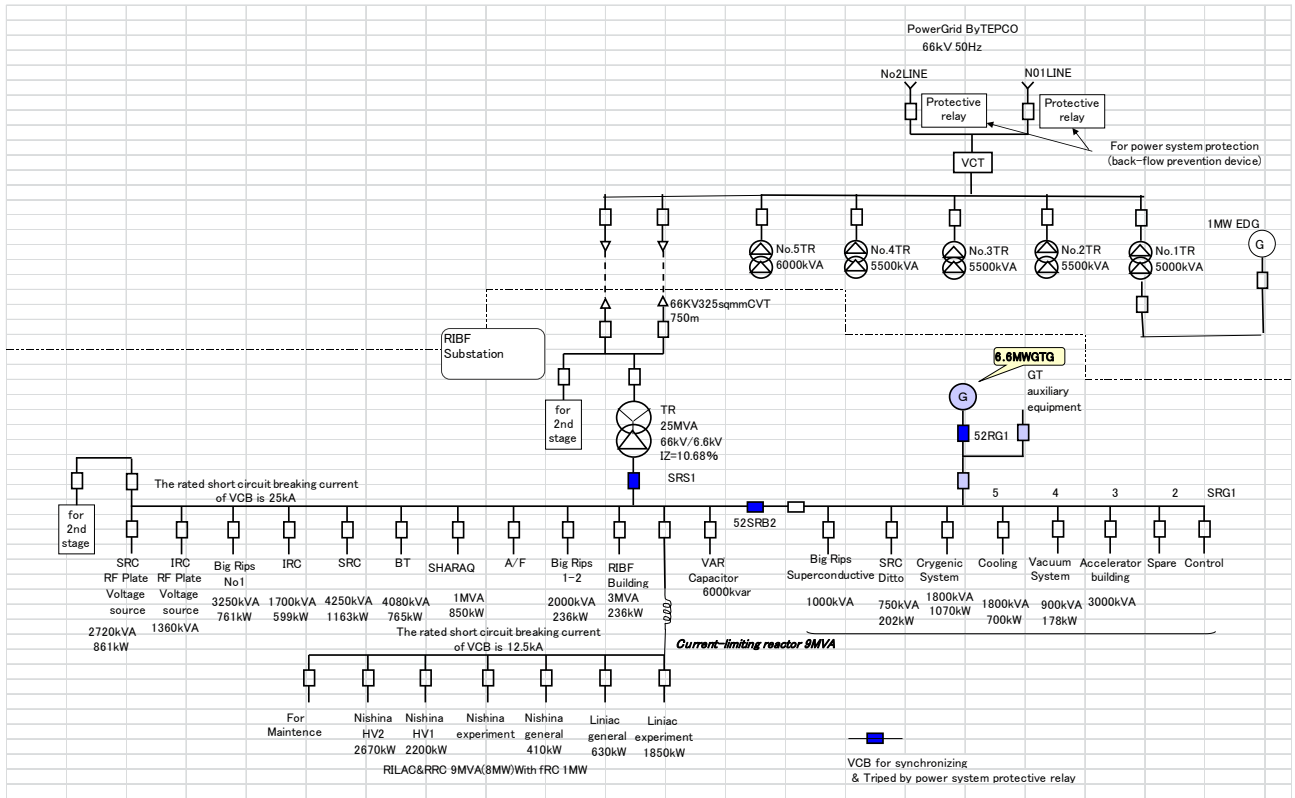


Figure 3: Single line diagram RIKEN HV and RIBF MV system right side will be covered by CGS when blackout happen. 52SRB2 is high speed circuit breaker.

### 3. 加速器用付帯設備

#### 3.1 加速器用ケーブル[2]

加速器施設には通電電流の大きい電磁石が多数必要で、多くの電力ケーブルが使用されている。しかしながら加速器建設に従事する者が多い物理学科はもとより、電気工学科においてもケーブルや電線についての科目はなく、メーカーがそれぞれ作成した、難解な電線要覧を教科書代わりに独学する必要がある。この為、配線工事は、機器据付や冷却水配管工事と同時に加速器製造会社や工事会社に、一括発注する事が多い。しかし、必ずしも、品質と経済性において最適とは言えない場合が多い。今回加速器特有の事例[2]を3例のみを紹介する。

##### 3.1.1 放射線遮蔽壁貫通

加速器施設の配線に係る最大の難所として、放射線遮蔽壁貫通がある。放射線を通さない程厚いコンクリートの壁は、ケーブルより発生する熱の逃げ場がなく、絶縁劣化を引き起こす事となる。

遮蔽壁内で発生した熱の電線長手方向の熱伝導による冷却効果は、熱伝導率の高い銅といえどもほとんど期待できない。このため、HIMAC 及び HIBMC と RIBF には独特の配線方式を採用した。

##### 3.1.2.1 HIMAC 方式(HIBMC 含む)

HIMAC の建設に際しては、船橋市の施工技術に関する研究所において、3 m 厚のコンクリート壁に 300 φ の貫通穴(鉄パイプスリーブ)を実際に作り各種実験を行った。

実験例として、先ず 600 幅のトレー一杯の 1 条(1 段)敷設のケーブルをそのまま俵積みとし貫通穴に入れ、熱電対をケーブルに埋め込み導体温度を測定した。電流を流すと、20 分程度で導体温度が、CV の上限の 90℃に達した。次に同じ敷設状態でケーブルの半数だけに電流を流したが、90℃への到達時間が 1 時間を超えたのみであった。金属棒をケーブル間に入れたり、パイプをいれた場合も同様であった。

結果として、スリーブ管の水平中心に配線棚(約 300 幅)を作り、半分のケーブルを 1 条敷設し、残り半分を貫通配管の下側に 1 条敷設する事で、600 幅のケーブルトレイ 1 条敷設電線全量を並べる事が出来る。この方式を採用すると、片側を防火壁として施工をしても、許容電流通減率は 0.7 弱を確保でき、600 幅のトレイと 300 φ の貫通穴が対の関係になる。本方式は、加速器配線のみならず、両施設の電気 JV 他壁貫通に電線を通す各社が採用している。

壁貫通施工時の大事な点は、防火壁仕様は片側のみとする事が肝要で、間違つて両側を塞ぐと電線の燻製を作る事になる。

##### 3.1.2.2 RIBF-SRC 方式

SRC の遮蔽壁は二重となっていて、SRC 側に厚さ 1 m の壁がある他、電源室側には厚さ 3 m の壁があり、配線用スリットが刻まれている。前壁と後壁の間は配線用坑道(cave)が凹字を構成している。

電流は 5kA を筆頭にトリムコイルも 3 kA、1.2 kA、600 A と発熱量が大きい上、壁も厚い為、強制空冷方式を採用した。

Cave 冷却には加速器からみて左側に押し込みファン

(FDF) 151 W × 3 台を備え、右側には、排気の為の吸引扇 (IDF) 400 W × 3 台とした。

スリット冷却用には 600 W の CD Fan (cooling duct fan: 一説には、スリット用ファンの為、China Dress と呼ばれる) を 1 スリットに 1 台ずつ合計 4 台用意した。各ファンの電源は、専用モーターコントロールセンター (MCC) より運転停止を行う。

DC 電源のインターロック盤と MCC 間は運転状況の情報交換があり、ファンが正常に働いていないと各コイルには通電されない。図 4 に CD ファンを示す。

HIMAC 方式も SRC 方式も問題なく運用されている。HIMAC においては、当時まだ珍しかったヒューズ社製の赤外線温度計で色々な電線表面を測定したが、いずれも設計温度以下である事を確認した。RIBF の SRC (片側 800mm<sup>2</sup> × 6 本) において、HIMAC でも用いた独自の計算ソフトでの設計値は室温 27°C で、ウラン加速の通電電流 5000A、一条敷設の電流逓減率を 0.7 として、ケーブル導体温度 69.9°C を得る。



Figure 4: Cable cooling system with FDF.

キセノン(Xe) 加速の場合は、励磁電流 3,615A である。この時の計算値は、導体 49.4 °C、表面 42.6 °C を得る。表面温度実測値は 6 本のうち最低が 36.5 °C、最高が 42.2 °C と良く一致している。強制空冷の効果であるが、最も温度が高くなる空気出口付近の電線表面の最低が 36.5 °C、最高が 39.6 °C であり、付近の遮蔽体温度は 31.8 °C の実測値を得た。これらよりシミュレーション (設計) の正しさが裏付けられた。

ファンの設計寿命は 2 万時間である。運転開始より 9 年 (約 8 万時間) が経過した現在も故障は 1 台もないが、いつ壊れても不思議がないので、念のために 6 年前に予備品として各 1 台 (計 3 台) を購入した。

### 3.3 がん治療用 X 線ケーブル (HIBMC)

がん治療装置では、レントゲン撮影 (TV 画像) 用の X 線ケーブルがあり、正式名は DC75 kV X 線用 EP ゴム絶縁ビニールシースケーブル (LC-XFPV-75-3) である。

ケーブルが長いと静電容量が問題になり、過渡現象に起因する画像のゆがみが発生する。HIBMC では治療室が 5 室あり、それぞれの部屋の隣に X 線室を作りレントゲン技士を配置する事は現実的ではない。この為、一般には 30m の許容電線長を 100 m まで延線可能とするケーブルを製作する必要が生じた。X 線装置担当の島津製作所との協議を重ねて仕様を以下のように決定した。

「DC 75 kV. 静電容量 (導体と遮へい編組間: 0.152  $\mu$ F/km (0.16  $\mu$ F/km) 以下. 第 1・第 2 線心) 抵抗: 8.1  $\Omega$ /km (13.6  $\Omega$ /km) 以下」 (既存の数値)。

A 団と呼ばれる電線主要 6 社に引きあいをした結果、昭和電線電纜と三菱電線工業の 2 社が対応可能との回答があり、島津製作所に納入実績のある三菱が選定された。図 5 に本ケーブルの断面を示す。X 線装置には、フラメントが 2 つあり、第 1 線心と第 2 線心が対応する。第 3 線心は両フィラメント間に接続し、共通の戻り線として使用している。

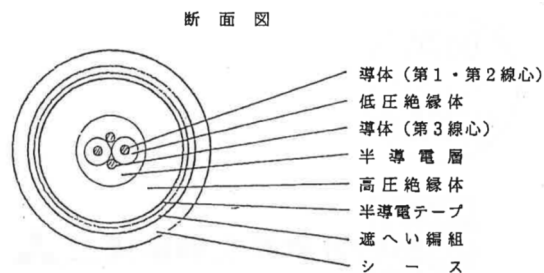


Figure 5: X-rays cable.

発注した全 23 ドラム中 18 ドラムが完成し工場試験を行った結果、抵抗は仕様 8.1  $\Omega$ /km 以下に対し全て第 1 線心が 5.03 から 5.10 (5.04 が最多)、第 2 線心が 5.05 から 5.13 (5.07 が最多)  $\Omega$ /km と満足したが、静電容量は 0.152  $\mu$ F/km に対して、0.156 から 0.165 (0.165 が最多)  $\mu$ F/km と仕様を満足出来なかった。このため、当方よりメーカーに対して以下を説明し再度製作を指示した。

静電容量 C は、線心面積に比例し、導体間距離に反比例する。C を少なくする為には、線心断面積を減らし、線心表面積を削減する。線心の直径が小さくなった分は絶縁厚を増加させ、電線の直径は守る。これにより、線心面積を減らし、導体間距離を増やす事が可能となった。一方、大きすぎる線心サイズを減らす事で抵抗は増加するが、静電容量を下げる事を優先する提案をして作り直し、C = 0.148  $\mu$ F/km の結果を得て合格した。R は 2 導体とも 5.19  $\Omega$ /km と多少増加したが、仕様を十分満足した。尚、不良品は短い区間なら何ら問題ないので試験結果と配線長を考慮して敷設した。

その他、HIBMC 用としてワブラー電磁石用ケーブルや低インピーダンスケーブルを廉価で特注し良好な成績

を得ている。

### 3. 稀少 RI リング (R3) 用架橋付天井クレーン [3]

RIBF の最新且つ特長あるクレーンの代表として R3 用クレーンについて解説します。

R3 は、短寿命核の精密質量測定に特化したイオン蓄積リングであり、実験棟ビームラインの終点に、新たに 2012 年度から建設が開始された。

本体室には多数の柱があり、その柱をさけながら荷物を搬送する必要がある。そこで、本クレーンは、3 台のクレーンガーダ(両端にサドル付き)、2 つの長さ 1.71 m の架橋と 1 台のみの 4.9 t サスペンションタイプホイストモーターより構成される。

ホイストは荷を吊り下げたまま、任意のクレーンガーダより架橋を渡り、別のガーダに懸垂され、ガーダが目的地まで移動する事により荷の移動を行える特長がある。

ホイストが橋を渡る時は、全てのクレーンガーダが一直線に並び、脱線防止を目的にガーダと橋は、圧縮空気動力のロックピンで固定され、その後にホイスト渡りが微速で行われる。図 6 に動作概念図を示す。

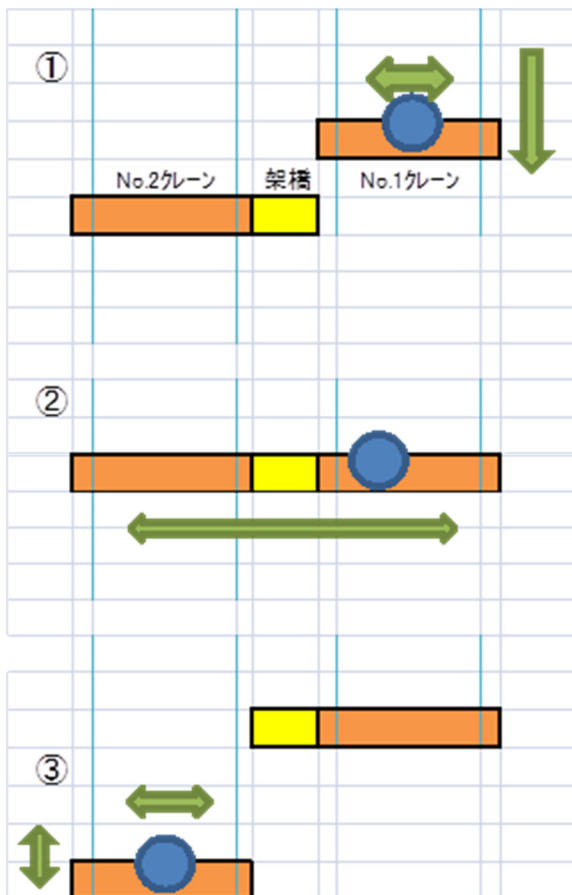


Figure 6: Transfer-bridge crane. ● Shows hoist motor.

本 R3 の他にも RIBF には多くの特長のあるクレーンが配備されている。RIBF 見学の際には、加速器本体のみならず、是非頭上の創意工夫されたクレーンにも注目していただきたい。例えば SRC 用クレーンは世界最小の 60 t クレーンと自負しています。

## 4. まとめ

2011 年の東電福島原子力発電所の事故に起因する電力不足の際は、CGS は年末まで連続運転を行い、高い信頼性を示すと共に、電力不足対策に貢献したと言える。また、環境面については、十分にその目的を果たしていると言える。最後に「手品のような話」は 3.3 MW の冷凍能力を発揮すれば同時に 6.5 MW の電力を発生する事となる。

理研の CGS の成功により和光市には、その後多くの CGS が導入され理研に追加されたガスエンジン方式の 2 台を加え、11 台にのぼり台数的にも容量的にも国内有数を誇っている。

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 の場合には、多くの超伝導電磁石があるためその有効性は顕著である。

CGS を導入する際に最も重要な事は、都市ガス配管それも中圧が近くにあるか否かである。幸いにも理研の場合は RIBF の敷地の隣まで中圧が来ており比較的簡単にガスの供給を受ける事が出来た。その点 HIMAC や ILC は、ガス供給の面で問題を抱えていると思われる。

CGS に関する資料はメーカーが作成したものが多く、ユーザーが記載したものが少ないためか、内外に多くの読者を得ている。[4]

ケーブル、クレーン、冷却系及び交流電源その他付帯設備に関しては、紙面の都合もあり、多くを語りつくせないが、他の加速器施設に比較して、特長のあるものに仕上がっていると自負している。

## 参考文献

- [1] 藤縄 雅、矢野 安重。大型加速器施設用無停電電源としての熱電併給装置。「加速器」Vol.8 No.12011(18-25)。
- [2] 藤縄 雅。加速器用ケーブル「加速器」Vol.11.No.1.2014(37-44)。
- [3] Tadashi Fujinawa. “Development of Cranes Used at Super-Sized Accelerator Facility RIKEN RI Beam Factory” Journal of Materials Science and Engineering A3(9) (2013) 640-645 ISSN 2161-6213.
- [4] <http://www.docin.com/p-53020564.html>