

話 題

加速器用ケーブル

藤縄 雅*

Cable for Accelerators

Tadashi FUJINAWA *

Abstract

Since accelerators are constructed with the latest technology, their specifications are frequently upgraded. Many kinds of cables such as high current power cables and low noise signal cables are used in the accelerator systems under special restrictions. The power cables for magnets are significant as most of them feed high current with low voltage. Sometimes they are massive because transmitting large kilo amperes requires many large cross section cables aligned parallel. These cables run through radiation shielding walls which could cause heat problems. In this paper, the author will mainly describe custom-made cables used in some accelerator facilities.

1. はじめに

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、一式発注する事が多い。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。

これまで著者が参画した、放射線医学総合研究所¹⁾(NIRS)の重粒子線がん治療装置²⁾(HIMAC)、兵庫県立粒子線医療センター³⁾(HIBMC)と理研仁科加速器研究センター⁴⁾(RNC)のRIビームファクトリー⁵⁾(RIBF)に使われた特殊な、すなわち電線要覧に記載されていないケーブル類について紹介する。

2. 関係する電気用語

2.1 ケーブルと電線

ケーブルは日本語で電纜(でんらん)と訳し、導体を絶縁物で覆い、さらに一層以上の sheath

(または jacket) と呼ばれる被覆で覆われたものを指す。一方電線とは、英語で wire や cord を示し、絶縁物が電線の外側を構成する接地線他に用いられる IV 線(ビニール絶縁線)や家電品のコードに用いる並行ビニール線を示す。ちなみにサンフランシスコの中国系米国人はケーブルカーを「電纜車」と書く。また日本では東芝発祥の「昭和電線電纜」という立派な会社があったが、現在は株主構成を変更の上、「昭和電線ケーブルシステム株式会社」と改称している。現在は電纜と言う漢字が使われない為、ケーブルの和訳に電線が使われる事が多く、「三菱電線工業」はケーブルを主に製造している。

2.2 高圧は MV

日本においては、電技省令第2条により交流で 600 V、直流で 750 V(路面電車の電圧)を超えると高圧となり、さらに 7000 V を超えると特別高圧と定義されている。しかしながら、海外では 1 kV までが低圧で(Low voltage : LV)、1 kV を超え 40 kV 未満(国により多少異なる)を Medium Voltage (MV) と称し、それ以上は High Voltage (HV) と呼ぶのが一般的である。故に英語の論文などで、6.6 kV を HV などと直訳すると極めておかしな事になるので注意が必要である。ちなみに中央リニア新幹線は 33 kV を採用予定であり、

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

当然 MV となる。

一方、海外の MV 等の電圧区分範囲は国により異なる上に、国際会議等で海外の加速器関係者に問い合わせても明確な回答はない。例えば、「米国では 13.8 kV は MV である」、「豪州は 11 kV と 22 kV が MV」と言うような回答が多く詳細規定は不明であるが、今回再度各方面に問い合わせた所、ドイツのみは DIN (Deutsches Institute für Normung: ドイツ工業協会)、VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik Informationstechnik e. V.: ドイツ電気技術者協会) と BDE (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: ドイツ連邦エネルギー水道事業連盟の意) に規定があり、監督官庁は“Bundesnetzagentur” (ドイツ電力・ガス・電信他の規制庁の意) という回答を得ている。

3. 電力ケーブル

電気品の周囲温度は、1933 年の山形市で記録された 40.8°C を基に 40°C を採用している。一方、加速器は空調の効いた室内に設置されており、空調運転時に周囲温度が 40°C に達する事はない。この為、上記加速器施設では、ケーブルの周囲温度を空調設計値の 27°C として計算を行い、13°C 分の許容電流を稼いでいる。但し、屋外からの電力ケーブルは他の電気品と同じく 40°C を採用する必要がある。単芯 100 mm² の 40°C 時の許容電流は 370 A であるが、27°C では 399 A と 8% 増加する。場合によってはサイズを 1 ランク下げる事も出来る。

3.1 一般的な電力ケーブル (CV, CE)

現在最も一般的に使われている電力線が CV と呼ばれ Cross linked polyethylene insulated polyvinyl chloride sheath cable (XLPE/PVC)、架橋ポリエチレン絶縁ビニールシースケーブル (vinyl sheath) である。絶縁特性が大変良く、低圧ケーブルから、超高圧の 500 kV までが生産されている。耐熱性も 90°C とビニール線等に比較して高い為、許容電流が大きく取れる特長がある。短絡時許容温度は JCS (日本電線工業会規格) で 230°C、国際規格の IEC (International Electrotechnical Commission) では 250°C と高く取れる。また、塩化ビニールの代わりに、ハロゲンフリーを目的に外装をポリエチレンとした

CE ケーブルをエコケーブル (ecology) と称して販売している。CV と CE は、電気特性は全く同じである。CV は CE より廉価 (economy) である。ビニールは難燃性⁶⁾ (自己消火性) に優れるが、一般のポリエチレンは燃えだしたら止まらない。そのため CE に難燃材を加えた難燃ケーブルが生産されている。

3.2 CVY (CEY)

電力ケーブルは、直径を小さくする目的で、円形圧縮と呼ばれる導体を圧縮する工程を加えている。素線も太く、絶縁物である架橋ポリエチレンはとても硬い。そのため、太い素線の円形圧縮導体と架橋ポリエチレンの硬さが相乗効果を持ち、太いケーブルはまるで金属製のパイプのように硬く、施工性に問題がある。そこで、太い電力線には CVY ケーブルの使用を推奨する。CVY の Y は、1970 年代に著者らが差別化を図るために命名したもので、柔らかい、撚り線を示す記号であり、当時の製造担当メーカーが Yz 社と Y 社^{†1)}であった事に起因する。CVY ケーブルは標準の円形圧縮の約 2 倍の素線数を持ち、非圧縮の為 (図 1)、可撓性 (かとうせい) に優れた電力線である。注作品ではあるが、標準品と比較し、銅量は同じで圧縮工程がないため製造単価を低く出来る。

本ケーブルは、低圧ケーブルではあるが、RIBF の超伝導リングサイクロトロン (SRC)⁷⁾ がクエンチした場合の電圧上昇 (想定値 3 kV) に十分耐えるものである。SRC には CVY 800 mm² を片側 6 本並列敷設して 5000 A を給電している。

著者の知る限り最低 60 mm² から 1000 mm² までの製造実績がある。上記の理由より電線要覧にない種類のケーブルであることから、注文時には、説明の手間を省く為、表 1 をメーカーに提示する

導体：円形圧縮 (CV の標準) → 円形撚り線



図 1 円形圧縮と円形撚り線

^{†1)} 代表的なケーブルメーカーである、住友、古河、藤倉、日立、三菱、昭和の頭文字を取ると S と F が重複する。その為、古河=横浜タイヤで Y、昭和=川崎市で K と呼んだ。また矢崎は Yz となる。

表 1 CVY ケーブル仕様例

導 体			絶縁体厚さ mm	シース厚さ mm	仕上外径 約 mm
断面積 mm ²	構成 本/mm	外径 mm			
325	127/1.8	23.4	2.5	1.9	33.0
400	127/2.0	26.0	2.5	2.0	35.0
500	127/2.3	29.9	3.0	2.2	41.0
800	127/2.8	36.4	3.5	2.5	49.0

導体は円撚り線 JIS C3102 による。

事を強く推奨する。

3.3 シンクロトロン用 CVY

HIMAC と HIBMC は数秒周期のパターン運転 (HIBMC では、最短の周期は、陽子で 1 秒、炭素で 2 秒。実際の治療は陽子 1 秒、炭素 2.2 秒) を行う必要がある。直流ならば低電圧になる電流であっても交流なので、負荷インダクタンスのために電圧が 600 V を超えてしまい、日本の規格では高圧ケーブルとなる。高圧ケーブルの場合、絶縁とシースの間に銅テープが巻かれ、電位を均一とする効果を持たせている。しかし、この銅テープと芯線との間の静電容量が大きくなり、伝送回路としての扱いが必要になってしまう。そこで、シールドと呼ばれるこの銅テープを外し、パターン運転に対応している。

絶縁特性に関しては、前述の IEC 規格に比較して、JCS 規格の絶縁層が厚いので、工場出荷試験の内容は、高圧ケーブルのまま変更なしで合格させる事ができ、絶縁特性は保証された。電線メーカーの監督官庁は経済産業省で規格外品を製造する事に躊躇する面もあるが、加速器の監督官庁は、医療用は厚生労働省で、研究用は文部科学省である。例えば、航空機や車両用の電線類は必ずしも JCS 規格に適合していない事を説明し、がん治療装置は経産省の自家用電気工作物とは異なり、JIS 印や T 印は不要と言う事で製作発注をしている。

3.4 ワブラー電磁石用専用ケーブル

がん治療装置における患者への照射方式の主流にワブラー (Wobbler) 方式がある。BT 系にて各照射室に入射される細いビームは、患者のがん病巣に合わせる必要がある。ビームを広げる為にワブラー電磁石が X 方向と Y 方向に 2 台用意され、ビームを 67 Hz^{†2} でドーナツ状に回転させ、さらに金属製の薄い板で作られた散乱体を通過さ

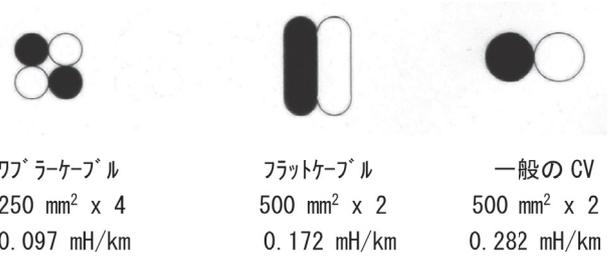


図 2 各電線配列とインダクタンス

せる。この時の回転半径と散乱体厚の選定により、一様に広がった照射野を形成し、後はコリメーター、リッジフィルターとボラスと呼ばれる遮蔽体の一種で病巣の位置と大きさ及び形に調整し治療を行う。

HIMAC では、ワブラー用磁石電源の出力電圧が 450 V と低い事もあり、負荷ケーブルにはビル設備などに用いられるカタログ品のレーストラック型をした低インダクタンスフラットケーブルが採用された。本電線は単芯ケーブル 2 本のインダクタンス 0.282 mH/km に比較して 61% の低インピーダンスを誇るものである。

他方、HIBMC では、磁石の電圧が AC 700 V (最大使用電圧 1 kV) となる為、低圧ケーブルであるフラットケーブルは使用できない。そこで、前述の IEC 規格における低圧は 1.0/0.6 kV である事に着目し、低圧仕様のまま、導体の配列を低インダクタンスになるように設計して、導体には CVY 方式も導入し、フラットケーブルに比較し電気性能と施工性で高性能、且つ廉価な CVYQ (Q: quaternary) 4 × 250 mm² ケーブルを特注し、同相 2 条 X の位置で使用した (図 2)。これによりインダクタンスは、0.097 mH/km とフラットケーブル 0.172 mH/km の 56.4% に削減された。

本ケーブルは JCS 規格品でない為、ワブラー専用ケーブルとして発注した為の命名である。当然、カタログ品ではない為、注文時には説明が必要である。

3.5 可撓性架橋ポリエチレン絶縁電線 (LMFC)

本電線は、WL1 と呼ばれ電気鉄道車両用配

^{†2} この周波数決定には、1987 年頃、理研加速器研究施設において、放医研と理研共同研究で 50 Hz から始めたとき、ビームの持つラインノイズのため問題となり周波数を上方へずらした経緯があるとのこと。

線に長く使用されているもので、可撓性に優れ、導体許容温度（寿命4万時間）が110°Cで許容電流が大きい特長がある。理研の研究者は自分で配線する場合があります、本電線が使用される。単芯100mm²が多く使われており、CV線（円形圧縮）に比較すると直径0.45mmを34本撚りし、さらにそれを19本撚りして100mm²の断面積を構成するので、施工性の良さが体感できる。車内配線専用で可撓性向上の為、シースが無く、絶縁体がむき出しのIV線と同じ構造であるが、絶縁層が多少厚い。価格はCV線に比べ高価である。

環境性と難燃性を向上させたEM-LMFCも販売されている。メーカーによっては、許容温度が90°Cのものもあり、許容電流重視の場合は注意が必要である。WL2は高圧用で、加速器には使われていない。

3.6 コルゲートケーブル

加速器施設の実験計測装置の電源には、ノイズカット機能付き磁気増幅器帰還自動電圧調整装置（AVR）が多く用いられている。本装置から計測装置用分電盤までは、ノイズが入らないケーブルを用いる必要がある。そこで、Colgate Armored Cableを用いている。コルゲートケーブルは鋼鉄製波付パイプでケーブルが覆われており、パイプの上にビニールまたは、ポリエチレンのジャケットの被覆付の構成となる。コルゲート装甲は、他のテープアーマーやワイヤーアーマーに比較し完全密閉の為、対ノイズ性が高い。その密閉性の高さより、法的に地中に直接埋設が可能なケーブルである。

RIBFではAVR以外でもケーブルトレイ等の電



図3 RIBFにおけるコルゲートケーブルの一般的な施工例

路支持物のない場所では、電線管を準備し配線するよりも廉価である為、経済的理由から一般的に本ケーブルが用いられている（図3）。

3.7 水冷ケーブル

RIBFのSRCの主回路は、5000Aと大きい上、SRC本体室と電源室間の放射線遮蔽壁が3mと1mと2重になっており、貫通穴内の発熱対策が重要であった。そこで水冷ケーブルを使用する事を検討した。

水冷ケーブル（図4）は主に電気炉やスポット溶接機で用いられ、古河電工パワーシステムズが販売しているもので、付属品等もカタログで準備されており実績の豊富な製品である。SRCメインコイルにはCW-500mm²（1000MCM）を片側2本（往復で4本）使用し、それ以外の超伝導トリムや常伝導トリムは250mm²を26本、150mm²を210本計画した。

水冷ケーブルは可撓性に優れており施工性が良い点も利点である。さらには、水冷化のため、電線断面積や本数も少なく、高価な銅の使用量の低減も可能であり、銅建値（たてね）75万円/トン時（H25年9月）では、ケーブル代材料費約2億円が半額以下となる。さらには、配線棚（ケーブルトレイ）も激減する。施工費やケーブルトレイ代を考えると膨大な原価低減となる。

水冷ケーブルの利点は、常伝導トリムコイルや電磁石などに使用しても活きるはずである。この場合磁石の冷却水配管と兼用する事で冷却水配管工事費も削減可能である。

残念な事に、理研では水に係るトラブルすなわち、漏水、接続部の抜け落ち、異物混入による水路閉鎖等を経験した人が多く、それらをリスクと考え、得られる利点よりも不都合・不具合の発生を恐れ本ケーブル使用は見送られた。

しかしながら、SRC完成後に著者の見学した

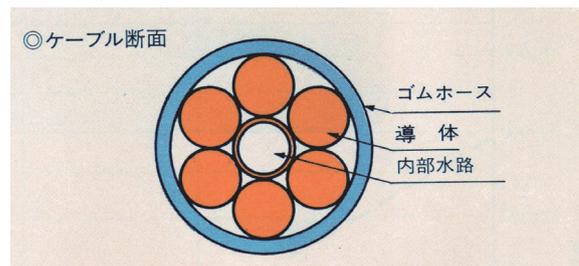


図4 水冷ケーブル断面図

米国フェルミ研では、水冷銅配管をそのまま導体を使用しており米国的決断の良さを感じた。今後加速器を建設する場合は是非検討願いたい。

尚、水冷にすると銅の節約にはなるが、電圧上昇により電源の出力増につながり、運転コストに影響する可能性がある事も留意点である。

4. がん治療装置用 X 線ケーブル

がん治療装置では、レントゲン撮影 (TV 画像) の X 線ケーブルがあり、正式名は DC 75 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 30 m 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: $0.152 \mu\text{F}/\text{km}$ ($0.16 \mu\text{F}/\text{km}$) 以下. 第 1・第 2 線心) 抵抗: $8.1 \Omega/\text{km}$ ($13.6 \Omega/\text{km}$) 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、フィラメントが 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。

発注した全 23 ドラム中 18 ドラムが完成し工

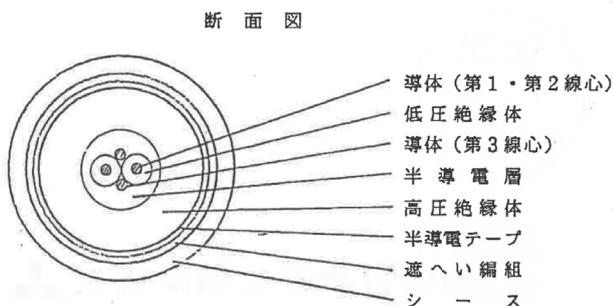


図 5 X 線ケーブル断面図

場試験を行った結果、抵抗は仕様 $8.1 \Omega/\text{km}$ 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) Ω/km と満足したが、静電容量 $0.152 \mu\text{F}/\text{km}$ に対して、 0.156 から 0.165 (0.65 が最多) $\mu\text{F}/\text{km}$ と仕様を満足出来なかった。

工場試験の席で、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、 $C = 0.148 \mu\text{F}/\text{km}$ の結果を得て合格した。R は 2 導体とも $5.19 \Omega/\text{km}$ 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。

尚、メーカーは仕様を示された数値は、目標値で保証値ではないとの考えであったが、我々の要求値を満足しないとシステムとして性能が出ない事を説明して納得を得た為、必要量を再製作させた。電線メーカーと話をする時は、目標値 (カタログ値を含む) か保証値かの注意を要する。

5. 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。放射線を通さない位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。

5.1 HIMAC 方式 (HIBMC 含む)

HIMAC の建設に際し、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 幅のトレイ一杯の 1 条 (1 段) 敷設のケーブルをそのまま依積みとし貫

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°C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°C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、パイプを入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も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の施工をしても、許容電流逓減率は0.7弱を確保でき、600幅のトレイと300φ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、間違っただけで両側を塞ぐと電線の燻製を作る事になる。

5.2 RIBF-SRC方式

SRCの遮蔽壁は2重となっており、SRC側に厚さ1mの壁がある他、電源室側には厚さ3m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3kA, 1.2kA, 600A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)151W×3台を備え、右側には、排気の為の吸引扇(IDF)400W×3台とした。

スリット冷却用には600WのCD Fan(cooling duct fan: 一説には、スリット用ファンの為、China Dressとも呼ばれる)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6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、当時未だ珍しかつ



図6 下段左側がファン本体、右はフィルター。ファンで冷却空気を押し込み、上に見えるケーブルの隙間を流れ、冷やしながら戻ってくる。

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800mm²×6本)において、HIMACでも用いた独自の計算ソフト⁸⁾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、表面温度69.9°Cを得る。キセノン(Xe)加速の場合は、励磁電流3615A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本の内最低が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7年(約6万時間)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4年前に予備品として各1台(計3台)を購入した。

6. 圧着端子と圧縮端子

日本の電線の断面積は、14mm²や325mm²

等半端な数値が多い。これは第二次世界大戦の敗戦により、米インチサイズ (AWG) をそのまま mm 表示した事に起因する。

また、以前は圧着端子の事を AMP 端子と呼んでいた。これは amplifier 用端子かと思っていたが、実は Airplane Marine Products 社の商品名であった。半田上げ端子に比べ、品質と施工性が大幅に向上した事は明らかである。前大戦の米国航空機産業と日本のその差を感じさせる端子である。圧着端子は英語では, solder less terminal で、圧着工具は crimp tool となる。

日本においては 325 mm^2 が圧着端子の上限である。一方、国交省基準を重んずる人達 (設備業者) は圧縮端子を 38 mm^2 程度のものから使う傾向があるが、端子の価格が 10 倍以上 (例えば 325 mm^2 では圧着が 780 円, 圧縮が 8,100 円) である上、工具の価格や施工性も大きく異なるので 325 mm^2 までは、圧着を使う事を強く推奨する。

近年、圧着端子の外国製と思われる粗悪品が日曜大工店等で売られている。端子の合わせ面の銀ロウ仕上げが悪かったり (ロウ付けしてない物もある)、導体挿入部の面取りがしてなかったり等の問題が、特に加工面が見えにくい絶縁付端子に多い。購入時には少なくとも JIS マーク付を購入すべきである。

理研はニチフ製品 (NTM) を多く使用している。理由は以下の通り

- 工具と端子を両方販売している。
- 250 mm^2 専用端子を販売している (現在建設中の RIBF 稀少 RI リング⁹⁾ で大量に使用した)。
- 市販端子は防錆の為「錫鍍金」を施しており、超高真空内で使用する場合はアウトガスが多い。このためメッキなしの電気銅裸端子を特注にて製作できる。
- 端子台との互換性が良い。
- 理研で行う労働安全衛生法の特別教育「電気取り扱い (低圧)」の実技講習の講師派遣をお願いできる、他。

7. CVV, CVVS と STPC (制御線)

理研には、在学中もしくは、院修了直後の若い研究者が毎年、大勢の新人として研究活動に参画

する。そしてインターロック配線に高額なシールド付ツイストペアを使用するが多い。本来 CVV 線が担当する分野である。CVVS の C は control 用で VV はビニール絶縁ビニールシースであり最後の S は shield である。磁石等のインターロックは一般に、冷却水断 (Flow switch) と温度高 (Thermostat) の 2 種である。それぞれに 2 芯ケーブルを配線するよりは、4 芯ケーブルを用いるほうが、材料費と工事費において経済的である。さらには、2つの接点の片側を共通導体として 3 芯ケーブルを用いればさらに経済的であり、HIMAC や RIBF のような大型加速器においてはその効果が大きい。もとよりインターロック線は、ON・OFF 接点のみであり、シールドは無用であり、ましてシールド付ツイストペアシールドケーブル (STPC) を用いる事は無駄遣いであり、言語道断と言える。

STPC の用途は次の通りである。2 芯電線を用い、配線を行うとループが出来て、それを貫く磁束量に変化があるとファラデーの電磁誘導の法則から起電力が発生し、この電圧がノイズとなる。

これを防ぐためには、STPC・対撚り線を用いると良い。さらに各対シールド付 (銅他の非磁性) としてシールドを片側のみ接地させ、外周にもシールド付 (軟鉄等で磁気シールド) とすれば万全となる。

8. ケーブルの耐放射線性

幸いな事に、私が参画した加速器施設においてケーブルが放射線の影響を受け、被覆や絶縁がパラパラ落ちるような経験はない。他方、27 年以上前に作られた理研リングサイクロトロン (RRC) では、施工性を重視して、クロロプレンゴムシースのキャプタイヤーケーブルを、上下多条敷設で大電流を通电している。少なくとも 13 年前からケーブルより図 7 の写真の如く茶褐色の油状の液体が当該ケーブルよりモレ出し現在も止まらない現象が続いている。当該メーカーではないが、F 社に調査を依頼した所、「クロロプレンゴムに強い放射線があたり、材料の分子構造が切れて低分子量化し、液体状態でゴム表面に染み出ている可能性が高い」との結論を得た。このような事が起きたこともあるため、加速器施設にキャプタイヤーケーブルは使用不可である。



図7 油状の液体を出し続けるキャプタイヤーケーブル。ケーブル上部にはRRCの静電デフレクターがあり高速中性子にケーブルはさらされている。左端は新しく敷設したMLFC。写真は真下より撮影したもの。

平成25年4月に、オーストラリアメルボルンで開催された Accelerator Reliability Workshop¹⁰⁾ (ARW2013) に出席した。その中で Parallel Discussions があり、放射線障害と防護に参加した所、ケーブルの耐放射線の資料がないとの発言が相次いだ。そこで私は加速器用ではなく原子力利用¹¹⁾の一覧表を持っているので帰国後委員に送付する約束をした。帰国後英訳の後、放医研経由で送付した。さらに調査を進めると、この20年間で光ケーブルはSI (Step Index Optical Fiber Cable) の 1×10^6 rad (3 dB/km 以下) から SM (Single Mode Optical Fiber Cable) の 1×10^7 rad (7 dB/km 以下)¹²⁾ まで向上している事が判明した為追送付した。

これらの資料が必要な方は参考資料先に問い合わせるか、著者まで連絡願いたい。

9. ま と め

加速器施設に使用されるケーブルとその使用方法について、約25年の経験を基に記載した。加速器学会はともかく、長期にわたり、加速器より禄(ろく)を得た者として加速器の世界に何らかの恩返しをしたく本文を纏めた。

思えば1976年着工のINDONESIA Surabaya 向け火力発電所¹³⁾の電路設計に取り組んだのがケーブル設計との係り合いの初めであり、CVYはKuwait Doha West 発電所用¹⁴⁾に矢崎電線に特注したのが最初である。設計に用いた前述のソ

フトの特許⁸⁾は、相当以前に特許切れとなっているので誰でも使用できる。

本文が加速器の配線計画の参考になれば幸いである。

10. 謝 辞

本文を作成するに当たり、株式会社ひょうご粒子線メディカルサポート 赤城 卓氏、三菱電機株式会社 原子力プラント部、株式会社 東芝電力システム社 原子力営業第一部、株式会社 フジクラ 新事業開発営業部、Unisun Japan K.K., 三光設備株式会社 プラント営業部および株式会社 島津製作所 医用機器事業部より多くの情報提供を受けた。改めて感謝申し上げる。

参考文献

- 1) <http://www.nirs.go.jp/index.shtml>
- 2) http://www.nirs.go.jp/research/division/charged_particle/himac/
- 3) Y. Hisikawa, et al: The cancer treatment system at Hyogo Ion. Beam Medical Center (HIBMC). J. Japan. Soc. Ther. Radiol. Oncol. 2002; 14: 73-77.
- 4) <http://www.rarf.riken.jp/>
- 5) 福西暢尚:「RIBF 加速器のビームコミッションング」日本加速器学会誌 4 巻 2 号 112 (2007)
- 6) 古河の原子力用電線・ケーブル要覧 (NPE 資 C-93014) 124
- 7) H. Okuno, et al: "Commissioning of the Superconducting Ring Cyclotron for the RIKEN RI beam Factory" IEEE TRANSACTION ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL.18. NO.2, JUNE 2008
- 8) 藤縄雅 他: 電力用ケーブル選定方式 特許登録番号 2635344
- 9) Y. Yamaguchi, et al: "Rare-RI Ring Project at RIKEN RI Beam Factory" NIMB 266 (2008) 4575-4578
- 10) 門脇徹人 他: ARW2013「ワークショップ報告」加速器学会誌 10 巻 2 号 111 (2013)
- 11) 古河の原子力用電線・ケーブル要覧 (NPE 資 C-93014) 125
- 12) K. Aikawa, et al: "Radiation Tolerant Optical Fibers" JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 29, NO. 22, NOV 15, 2011
- 13) 藤縄雅 他:「インドネシア・スラバヤ火力発電所における比較的長距離な低電圧送電」日本大学生産工学部第 14 回学術講演会 2-49 (1981)
- 14) 藤縄雅 他:「クエート・ドーハ・ウェスト向 多心複合ケーブルの開発」日本大学生産工学部第 16 回学術講演会 2-16 61 (1983)