

話 題

核理研 HIGH DUTY LINAC 冷却系の 30 年間のメンテナンス

高橋 重伸*

Maintenance of High Duty Linac Cooling System for 30 Years at Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University

Shigenobu TAKAHASHI*

Abstract

The cooling system for 300 MeV linac at LNS, Tohoku University has been continued for about 40 years to supply the intense electron beam for a lot of experiments. However the water leakage due to corrosion occurred frequently at welding parts and aluminum gaskets for the pipe joint. Accordingly the degradation of the performance of the system is serious. In this report I describe about the typical malfunction examples and evaluation of many items to be measured for re-construction of the cooling system that I have experienced for 30 years.

1. 概 要

東北大学原子核理学研究施設（核理研）の電子リナックは原子核研究や RI 製造のために、STB リングへの入射からパルスビーム自体の利用まで多様な運転モードを有している。その性能は、加速エネルギー、平均ビーム電流について、1 系は 15~65 MeV, 150 μ A, 2, 3 系では 100~220 MeV, 10 μ A, パルス幅、繰り返しは 3 μ sec, 50~300 pps, Duty Factor 0.1% で

電子リナックでは国内最大のものである。

冷却設備は約 40 年間にわたる High Duty 運転による放射線損傷、冷却水の汚れ、腐食やヒートサイクルに伴う経年変化等により損傷を受け、多くの機器配管を更新あるいは修理改造をして現在でも共同利用実験に供している。図 1 に冷却系ブロック図を示す。

私はリナック建設後 8 年目に着任し、初期の頃は何もわからないまま冷却系担当と言う事になり、以来、約 30 年間、残留放射線や泥と戦いながら保守・

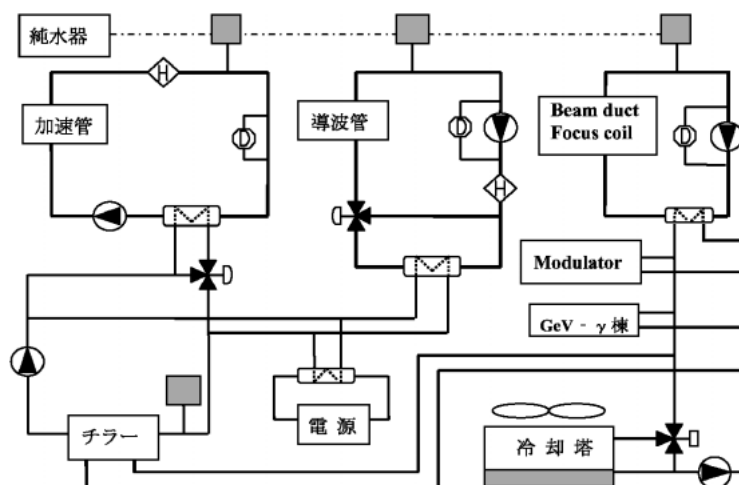


図 1 冷却系ブロック図【H: ヒータ, D: デミネラライザ】

* 東北大学大学院理学研究科 附属原子核理学研究施設
Laboratory of Nuclear Science (LNS), Tohoku University

改造をしてきました。また、加速器の研究会などでは、諸先生方の知識や経験を教えて頂いた事が、これまでのメンテナンス等に役立ち大変感謝しております。本報告では典型的な故障例及びその対策や改造例（●印で示す.）について述べるが、緊急を要する修理などが多く、定量的なデータが少ないため、事後処理的な観点、経験的側面から見た説明になる事をお許し願いたい。

2. 純水温度調節系統

これは加速管水系，導波管水系のことで，水温 $40 \pm 0.1^\circ\text{C}$ ，循環水導電率は $1 \sim 2 \mu\text{S}/\text{cm}$ である。

2.1 加速管 (ACC) 水系

リナック上流側(A部) 8本，下流側(B部) 12本，ECS用1本の計21本の加速管にそれぞれ $60 \text{ l}/\text{min}$ を循環する。圧力は 1 MPa で核理研では一番高い。ポンプは10年前にメカニカルシール部からの水漏れにより同型式のポンプに更新，同時期に吐出バルブを電動化し，ポンプと連動開閉するようにしてある。

- Honey-Well社のパドル式フロースイッチ (FS4J-1) を21台使用しているが，SUS製パドル部が高流速水の振動により折れる故障が年3~4個程度あった。当時の修理方法はパドルを2枚重ねに改造して使っていたが数年前からパドルの厚みが大きくなって折れにくい構造となり，故障頻度が低下している。
- 2004年7月，加速管接続用のSUS管と銅管溶接構造の水ジャケットが，その接合部から水漏れした。旧型のもので，SUSと銅管を銀ロー付けしてあるが，溶接しろが少なく，配管振動により亀裂が入り易い。対策は，両材質に親和性のある真鍮管を両管の間に入れ，溶接補強したジャケットに交換した。この配管の故障は10年前までは多発していたが在庫予備品があったので，短時間の修理で完了した。この水漏れの際，フロースイッチ作動によりフェイルセーフ機能が働き，ポンプ停止及びバルブ閉止は自動作動された。
- 2004年9月，水位レベルセンサの動作不良により，ポンプ起動ができなくなった。ビニールホース連通管が弛みを生じ，センサが正しい静電容量を検知できなかった為に起こったものである。水位レベル連通管はガラス管などリジッドにすると，衝撃で割れる恐れがあるので使わなかった。対策として，センサをしっかりと，連通管に留めて置くようにすることが必要である。



図2 加速管のRF入力カプラの両側に冷却ジャケットを取り付けて，シンフレックス管より導波管冷却水を通水している。

2.2 導波管 (Wave Guide) 水系

圧力 0.35 MPa ，総流量 $300 \text{ l}/\text{min}$ ，導電率は $1 \mu\text{S}/\text{cm}$ である。導波管（以後，WGと言う。）に溶接されている水ジャケット部のみを循環するので流路構造がシンプルであり流程も短い。そのために，循環水の純度低下が少なく，きれいな水が流れている。

図2はA部加速管入口側モード変換器の両側にジャケットを付けてWG系循環水を通水している写真である。しかし，この2~3年は水漏れが頻発していて，これまでとは違った箇所からの漏水が多くなってきている。その原因として一番多いのは，ジャケットの溶接材として使われているハンダの純水溶出である。その接続箇所は数百以上にも上り，漏水する恐れのある箇所は非常に多い。

細管路の修理対策として，約20年前よりN2型シンフレックス管を使っている。この管材を用いる理由は，溶接が不要，安価，銅管より放熱が少ない，フレキシブルであるため配管敷設経路を自由にできる，配管や継ぎ手の着脱が容易であるなどの利点があるため，銅管による敷設を止めてこの方式を採用している。欠点としては，継ぎ手部分の口径が銅管（外径 15ϕ ）より小さくなるが，流量は $8 \text{ l}/\text{min}$ 程度であり問題はないと思われる。WGには全てオス型フレア継ぎ手が溶接されているために，その両管材の変換が面倒であった。フレア継ぎ手とシンフレックス管の変換に新方法（フレア銅管を使わない方法）を2004年9月から試験的に行っている（図3参照）。それは直接フレア袋ナットに $3/8$ インチ RC ネジでタッピングして， $1/2$ インチシンフレックス管に変換している。利点は銅管フレアがいらぬ，溶接作業や途中の継ぎ手が不要，モジュレータ裏側などの狭隘場所の

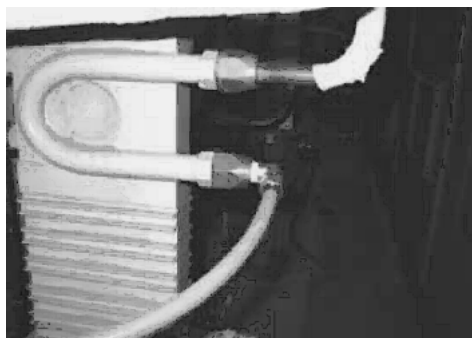


図3 N2型シンフレックス管とフレア継ぎ手との接続

配管接続におけるメンテナンス空間確保などに有用であると考えている。このシンフレックス管は、リナック本体室A部加速管の中間部においてモード変換器冷却用ジャケットに5年間以上の使用実績があり、修理部分は数10箇所を超える。しかし、放射線量が多いリナックB部入り口や出口のシンフレックス管は放射線損傷により硬化し折れ易くなる為に、緊急修理時以外は、従来の銅管接続にしている。

ポンプは2001年、メカニカルシール部の水漏れにより同形式のポンプに更新した。クライストロン室のオリフィス型フロースイッチは当初のものを現在も使用している。以下に故障・改修例を挙げる。

- 1976年、RF窓セラミックのメタライズ部分から真空側に漏水し、B部加速管12本を浸水させる事故があった。その後、窓を定期的に交換するようにしているが、高額部品であり全数用意することは無理がある。また、このような水没事故が起こる可能性は否定できない。現在は真空度変化を自動監視している。
- 加速管RF入力部のモード変換器が冷却されていないため、マイクロ波のパワーが印加されてから温度平衡状態になるまで時間がかかった。これは、加速管の温度測定時に発見された事であった。その後、A部加速管8本の入力側のみに水ジャケットを取り付けてWG冷却水を通水して温調している。しかし、B部加速管列はそのままなので、RFパワーON時から15分間程度は加速待機時間としている(図2参照)。
- 2003年4月、修理のために流路を閉じて昇温運転を開始してしまった。このためにフィルタ部アクリル流量計が水温上昇により溶解破損した。フロースイッチのインターロック機能を殺した事が原因で発生した事故である。フロースイッチの動作不良の為に、殺して運転する事がたびたびあった。
- 2004年には、配管室設置のフラップ流量計の鉛パ

ッキン部(1台につき2箇所ある。)からの水漏れ、あるいは染み出し傾向が見られたので、A部流量計を8箇所交換、B部流量計12箇所は撤去し、ソケット接続としてある。新規流量計は安価であり、縦-横自在に取り付け可能で、パッキンはNBRであるが、配管室はリナック本体側とコンクリート壁で仕切られているので、10年程度は使用できるものと考えている。

3. 純水粗温度調節系

3.1 BF (Beam-duct · Focus-coil) 水系

水温 $23 \pm 1.5^\circ\text{C}$ 、(夏期は 30°C 程度になる。)、圧力は 0.7 Mpa 、循環水導電率 $1 \sim 2 \mu\text{S/cm}$ である。

水質劣化を防ぐ為に粗フィルタ及びデミネライザが装備されていて、総循環水量の3%程度を分流している。BF水系は、リナック本体室や各実験室内の真空ダクト、分析スリット、各系偏向電磁石、加速管集束コイル(A1加速管のみ)及び第1、第2実験室の実験装置を冷却する。配管経路が一番長く、放射線損傷による影響も多い、また様々な実験装置が接続されており、水系内も汚れ易い。そのために冷却水の導電率の管理は重要となる。1985年頃から、直接ビームが照射され水系内を汚染する場合には、BF水系から分離し別水系にするようにしている。16年前にアルミ真空ダクトの冷却にアルミ材の水ジャケットをダクトにネジ止めしてあるが、ここからの漏水は無い。放射線損傷による劣化の激しいものにはゴム、プラスチック、テフロンなどの高分子化合物、銅配管、ガラスがあり、放射線が強い場所における流量計やフロースイッチ等の部品はピット内や配管室など直接放射線(主にガンマ線)を受けない場所に設置するようにしている(図4参照)。

- ビームスリットは1ヘッド(片側)あたり 30 l/min を直列に通水しているが、残留放射能が非常に強い為、修理しにくい箇所である。2003年、A部下流スリット(SD1)の銅製ヘッドから真空側に水が染み出し、圧力の関係で凍結凝固する真空トラブルがあった。漏水確認は、ヘッド内の水抜き後、ドライヤーで乾燥させて、ヘリウム真空リークテストにより行った。原因はヘッド部の溶接不良と純水による銅の侵食などの経年変化にあると想像される。過去に何回が同様の故障があった。また、スリット本体と接続するフレキシブル配管(以後、フレキ配管と言う。)には、それぞれ 3 mm 厚の円形鉛板パッキンがスリット1基全体では8箇所、その他、本体内に口径の大きい鉛パッキンが2箇所、

合計10箇所使用されており、純水により鉛が侵食され1箇所あたり2年ほどで水漏れが起り、長年大変な被爆作業を強いられてきた。2004年2月に、リナック出口付近のスリットのフレキ配管を、鉛パッキンを使わない曲げ半径の小さいSUS管に改造更新した(図5参照)。配管取り付け位置もヘッドの駆動負荷にならないようなU字取り付けとした。スリット周辺の配管接続に使用しているテフロンシールテープは粉状に変質してしまうために使用を最小限にとどめ、継ぎ手材はSUS材スウェージロック接続とした。鉛パッキンを一切使わないリナック出口偏向系に設置の3系分析スリットは取付けから7年間経過後も順調に稼動している。建設当時は、ビームハンドリングがうまくいかなかったために、スリットやコリメータによりビームを強制的に削ぎ落として運転していたが、現在はビーム診断装置の設置により、ビームの位置やプロファイ



図4 ピット内に敷設された流量計

ル測定が可能であり、さらに将来、電子銃の改造により低エミッタンスが実現すれば不要な制動輻射によるガンマ線の発生を抑制する事で残留放射線の低下が期待される。

- LDM (Large scale Deflection Magnet の略) スペクトロメータの水漏れ修理ミスがあった。漏水箇所の調査をしないで接着剤を塗布したが漏れは止まらず、結局、2m長ファイバースコープによる漏れ箇所捜索を行った。その結果、その先の手の届かない狭隘部分から漏れ出している事が解った。対策として、市販の自動車用ラジエーター漏れ止め材を循環させたところ、漏れ箇所は閉塞した。現在までの3年間、水漏れはない。簡易補修剤としては有用であるが、植物繊維材で作られているので、放射線に対しては弱いであろう。
- BF系のフロースイッチ、流量計は殆ど使用不能となっている。フラップ式流量計は前述のWG水系と同じ型式のもので、鉛パッキン材や真鍮製フラップが循環純水に溶出し破損している。図4にはリナック出口偏向系の放射線量の多い場所に設置された現場指示流量計である。安価な市販品でパッキンはNBR、フラップはSUS、本体は真鍮材を使用している。最近ではICチップを内蔵した安価な渦流量計等が出回っているが、リナック本体室でのIC搭載部品はリスクがあるため、核理研ではまだ使用していない。
- ヘッダー及び連絡管にはSUS管が使用されており、そのフランジにはアルミ製波型パッキンが使われている。このパッキンが純水へ溶け出し、リークが多くなってきている。この漏水場所探査について、実験室内ではヘッダー管が床面のピット内に敷

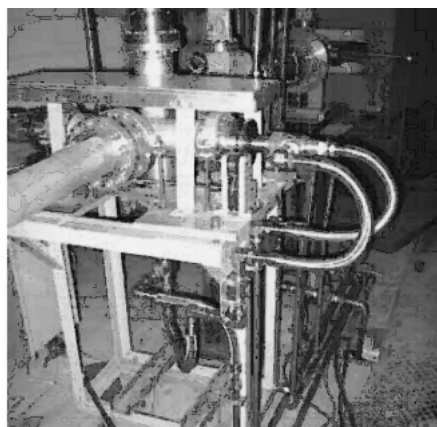


図5 リナック出口付近のXY軸用スリット。左図は改造前のフレキ管で、鉛パッキンを使用したフランジ接続であるため2~3年で漏水し、修理時の被爆線量は多かった。右図は改造後写真。

設されているため、シールド用コンクリートブロックなどで塞がれている場所があり、漏水場所の特定が困難となっている。そのため、ピット内の染み出し跡で判定している。

3.2 純水補給系

市水から活性炭ろ過、イオン交換をして純水を製造し、各タンクに供給する装置である。製造能力は1トン/hの流量で10トン/cycleである。2001年に栗田工業製カートリッジ型純水器DX-50を導入した。常時使用する為にデュアル化してある。それまではガスマスクを付けて年に4~5回樹脂再生作業をしていた。塩酸と苛性ソーダの劇物薬品を使用しないことや、排液が出ない事など、また市水を入り口側に接続するだけで低導電率純水(0.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 以上)が製造できる点など以前に比べてはるかに安全になった。

4. 市水粗温調系

放射線に曝されない水系であり、市水を循環させている。冷水系と冷却塔水系(以後、タワー水系と呼ぶ。)に大別される。フィルタ系を備えていないので、定期的なドレイン洗浄が必要である。

4.1 冷水系

10 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$ の温調水系で圧力0.5 MPa、総流量300 l/min。加速管および導波管温度制御用の冷水を発生循環させている。チラーは15年前に25~100%無段階能力可変式のスクリュエ型に変更した。冷水系の主配管材質は铸铁管で施工されているために、管内の錆び・コブの発生が著しい。過去に数回、酸性洗浄材を投与していた事も腐食を促進した疑いがある。導電率管理をしていないので、定期的にドレインしないと冷水は鉄サビの発生により茶褐色となる。目視判断により、2ヶ月に一度程度の割合で水を置換している。錆

びの発生しにくい塩ビ・ライニング鋼管あるいはSUS管への更新が急がれる。

- 2004年9月と10月のほぼ同時期に、WG水系及び加速管水系熱交換器の冷水側から水漏れが発生し、铸铁製圧力容器の腐食によるピンホールが開いていた。前者は溶接部腐食が原因で新規管を再溶接した。後者は2液性接着剤で仮修理を施したが漏れは止まらず、2004年8月のリニアック研究会において水漏れ補修材「マルチメタル」をKEK加速器研究施設の小川雄二郎氏及び池田光男氏から教えて頂き、早速、購入して修理し、現在までの1ヶ月間、漏れはない。心から感謝御礼いたします(図6参照)。
- 2004年8月にチラー冷却器(蒸発器)内からフロン22冷媒及び潤滑油が冷水側に漏れる故障が起り、循環水は白濁色になった。同型の冷却器と交換し、水系内の油は台所用合成洗剤を1リットル程度投入循環および洗浄後、数日で回復することができた。現在フロン22使用のチラーは製造中止となっている。

4.2 電源室水系

リナック用分析電磁石電源、LDMスペクトロメータ用電源、磁場測定用PILOT電磁石の冷却に供される。総流量は30 l/min、圧力0.2 MPaで一番保有水量の小さな水系である。建設当時から約10年間、水道水のタレ流し冷却をしていたが、蓄熱槽を設置し、冷水系から20 l/minを分流している。

- 2003年、この蓄熱槽内の熱交換器である銅管に数箇所のピンホールが開き1次水側に漏れてオーバーフローしていた。原因としては、数年前に槽内に酸性洗浄剤を投与したことによるものと思われる。

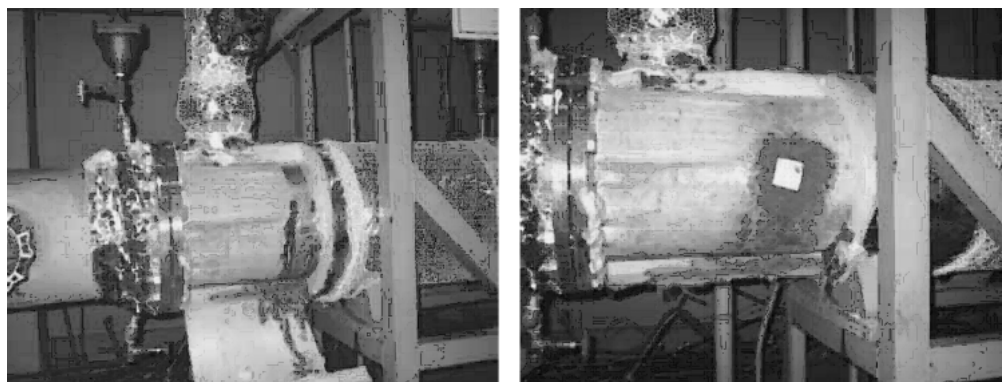


図6 左図は加速管多管式熱交換器の冷水系側からの仮修理後からの水漏れ写真。右図がマルチメタルで補修後の様子。押さえの為にアルミ板を付けている。

4.3 タワー水系（冷却塔水系）

循環水温は通常、 $22 \pm 2^\circ\text{C}$ 、夏期は 30°C 程度まで上昇する。圧力0.2 MPa、循環水導電率は約 $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ 。リナック、各実験室及びGeV- γ 棟の負荷で発生した熱を最終的に屋外に放熱して各水系温度を適正値にしている。400冷却トンの開放型角型冷却塔に5年前更新した。2003年夏にはタワー用薬注装置を更新し、薬液タンクを100 lと大型にした。タワーポンプと連動して動作し、薬液の滴下時間を調整できるので藻の発生の抑制などに役立っている。薬品はマルチ剤を使用している。

タワー水系の問題としては、開放型冷却塔であるためにどうしても外気粉塵の混入は避けられない。この冷却水は直接、モジュレータ内の充電チョーク、パルストランスオイルタンク、クライストロンコレクタ冷



図7 クライストロン室東壁のタワー水系伸縮継ぎ手

却装置の熱交換器に循環している。1993年までの10年間、コレクタ冷却装置の熱交換器内に付着した泥やカルシウム成分除去のための酸洗浄をしていたが、鋳鉄製圧力容器（図8の左図参照）が腐食して穴が開いた為、この洗浄を止めている。また、この容器内面から剥離した鉄サビ片や外気粉塵が水系内を再循環し、モジュレータ内の各負荷配管の流量計やストレーナを詰まらせ、伝熱阻害を起こしたことがある。2000年にモジュレータ周りの1インチ細管路を、塩化ビ・ライニング鋼管に更新した。この水系はメンテナンスでは毎年手間のかかる系でもある。将来的には、屋内水系内への粉塵混入を防ぐ為に、水系をプレート熱交換器で分離し、別水系として各モジュレータやチラーへ清浄水を循環すれば、解決する問題である。

- 17年前にヘッダー往還伸縮継ぎ手より複数箇所同時に水漏れが発生した（図7参照）。これは酸性系洗浄材で循環洗浄後、中和剤により中和したつもりであったが、洗浄効果が強く、SUS製の継ぎ手にピンホールが開いたため、8箇所全数交換した。長期間に亘り、50 m長の主往還ヘッダー配管断面の半分程度まで堆積していた泥を5年前に高圧水（18 MPa）洗浄方式で排出した。各モジュレータ負荷へはストレーナの設置により防いでいるが、再循環された鉄錆びなどの頻繁な目詰まりのためにメンテナンスが多くなっている。
- 冬期などの外気温変動時のタワー水温度安定化のために3方弁が備えてあるが、この温度センサは電気式サーモスタットで行っている。このサーモ内の

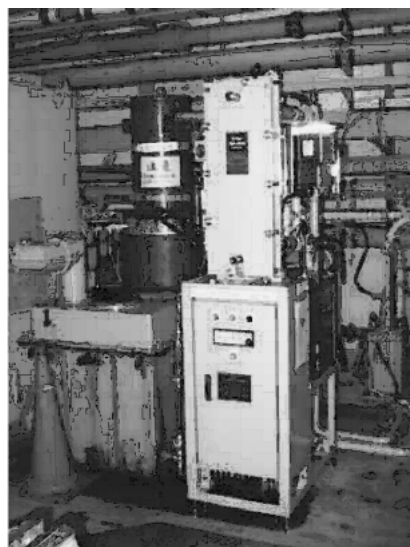


図8 新旧のクライストロンコレクタ冷却装置。左図は旧型の側面で熱交換器下側にFRP樹脂を貼り付けた修理跡が見える。

摺動抵抗 (0~135 Ω) 部の磨耗による故障が2~3年に一度起こる。その原因としては、タワー水の温度設定幅が±1°Cと狭かったことや、ポンプ停止中でも常時動いていた事が挙げられる。現在は温度設定幅を±2°Cにして、ポンプの運転停止と連動させた。3方弁のセンサは、将来、可動部のない方式を採用したい。また、2004年には、この弁設置後14年間にパッキン部から漏水した。この弁は制御盤付近の天井に取り付けられているが、漏れた水滴が盤からずれたので大きな被害はなかった。これは弁の設置場所選定の誤りである。また、パッキン部の漏水対策として、導水路が必要であると思っている。

- VAPODINE 装置 (クライストロンコレクタ冷却装置) は2002年に3号及び5号機の熱交換器を多管式からプレート式に更新した。3号機の新冷却装置 (図8の右図参照) の2年間に起こった故障は、更新数ヵ月後に、アクリル製タンクの底板と側板の重合接着部から水漏れが発生した事がある。原因としては、WG水系の40°Cの循環水を、タンク内が空の状態から補給した事が何回もあり、これにより重合部が剥がれて漏水したものと思われる。重合接着はメーカー技術者の技量によるところが大きいので注意が必要である。

現在では10 mm厚の透明塩ビ材による接着方式に変更し、内側には三角柱の補強材を付けて接着面積を多くしている。その後の漏れはない。2004年には装置タンクの水がオーバーフローした故障がある。これは水位センサの誤動作により給水電磁弁が給水継続状態となり発生したものである。原因は半導体式圧力センサのケーブルの曲げ半径を小さく取っていたために、内部の大気圧導入用パイプがつぶれたものと考えられる。5号機の故障は、2004年に1次冷却水 (純水) 温度が上昇したことがあった。これはプレート熱交換器2次側タワー冷却水のストレーナメッシュの目詰まりが原因であり、メッシュサイズを多少大きなものに変更した。このストレーナ清掃は年に2, 3回行う必要があり改善の余地があると思う。

5. 制御系及び電源動力系

更新が一番遅れている場所である。制御盤は製作会社名から (三菱) 重工側と電機側とに分かれていて、前者は加速管、タワー及び冷水系を、後者は導波管及びBF水系を制御している。各制御盤内には一部PLCを導入したり、更新機器は別制御盤に移設しているが、度重なる配線換えなどにより、内部は今昔一

体となっている。Ethernet対応の温度記録計や調節計を購入設置したので、まずは、タンク水位レベルを計測し、異常な漏水による水位低下を検知できるようにしなければならない。また、冷却系の各部の温度データ等をリナック制御系に連動させて、冷却系の異常時には緊急停止などの措置を講ずるようにしたいと考えている。

6. 最後 に

建設時においては、リナック冷却系に敷設された銅管口径は10~28φのミリサイズ配管であったが、時の経過と共にインチサイズ管もあちこちの水系に取り付けられてしまった。それからサイズの異なる配管の無理な溶接や継ぎ手接続もあった。そのため多種類の在庫部品を用意しておく事や故障修理時の部品探しなど大変手間取った経験がある。現在でも混在している箇所はあるが修理改造の都度、ミリサイズに戻している。また、材質の点でも、基本的には純水循環系の細管は銅管および青銅や真鍮製部品で敷設されているが、鋳鉄製の継ぎ手等が取り付けられた事があり、リナック水系に接続する実験装置の設置やリナック改造工事の際には、関係者には配管サイズや取付けネジ規格、材質などを統一するように要請している。

冷却系担当初期にはフレアリングでつばを大きくしてしまったり、メス側フレア継ぎ手を入れ忘れたり、シールテープを逆巻きに取り付けたり、酸性洗浄剤を循環させて配管を傷めていた事など、失敗を重ねながらメンテナンスをしてきた。また、ある教官とは「水と電気は同じ考えで良い。」とか「タワー水系ヘッダーの水漏れ原因はキャビテーション現象による腐食である。」などと、水の物理的あるいは化学的性質による影響を無視した考え方について議論した思い出がある。

冷却系は、加速器の中でも、基本的な要素の一つであり、常に万全にしておかなければならない。メンテナンスのコンセプトとしては、ノンメンテナンスを目指し、また残留放射線環境下での修理の容易性や汎用品を使用する事、また水質や温度管理の重要性などがある。BF水系のアルミや鉛パッキンの腐食や、WG水系のハンダ溶接材の溶出、冷水系の錆の発生など水系全部に亘る事柄あるいはタワー水系の分離案などは、現状予算措置で一度に解決することはできないため、場所ごとに修理している。現在まで冷却設備は40年もの間、よく動いてきたものではあるが、このあと10年も維持するには特別予算措置を講じないと無理であろう。