

# リニアコライダーにおける冷却水システムの検討

池田清<sup>1,A)</sup>、片岡正行<sup>B)</sup>、竹内康紀<sup>C)</sup>、竹田繁<sup>C)</sup>、畠中正和<sup>A)</sup>、山下了<sup>D)</sup>、吉岡正和<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> 川崎重工株式会社

〒105-6116 東京都港区浜松町 2-4-1

<sup>B)</sup> 川崎設備興業株式会社

〒151-0051 東京都渋谷区千駄ヶ谷 4-28-4

<sup>C)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>D)</sup> 東京大学素粒子物理国際研究センター

〒133-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

## 概要

高エネルギー物理学次期基幹計画は重心系エネルギー500 GeV、ルミノシティ  $>10/\text{nb/s}$  のリニアコライダー (JLC) である。加速器の消費電力は200~300 MW クラスとなるが、消費電力のほとんどは加速器トンネル内で熱になる。その冷却水システムは大規模なものになり、加速器の性能、初期コストや維持・運転にも大きな影響を与える。KEKB の経験を踏まえて C-band リニアックに基づくリニアコライダーの、冷却水システムの検討を行った。

## 1. はじめに

JLC 計画は2010年頃の実験開始を目標に種々の検討が行われている。本稿では JLC の主リニアックとして C-band 周波数の RF システム<sup>[1]</sup> でビーム負荷時加速電界強度が 35 MV/m を想定した主リニアックの冷却水システムについて論ずる。主リニアックは、それぞれ1000台の加速ユニットから構成される。1ユニットの全長は10m、エネルギー利得は250 MeV/ユニット、1000ユニットでエネルギーは250 GeV、全長は10kmとなる。消費電力は最大繰り返し周波数150 Hz のとき150 kW/ユニットとなる。消費電力は繰り返し周波数に比例する。全消費電力の最大値を300 MWとして設計する。

JLC の立地条件は加速器の安定性、トンネルコストと必要な工事期間、土地利用権などを考慮すると、均質な硬岩地帯の大深度地下に全長~30 km のトンネルを掘削することになる。図1に示すように、トンネルは並行に2本掘削し、一方の直径3mのトンネルに加速管を設置し、直径4.2mのもう一方のトンネルに電源、クライストロン、ユーティリティー等を納める。消費電力はほぼ全てトンネル内で熱負荷になるので、これを冷却水システムで地上に搬送し、地上の冷却塔で空中に放出する。冷却水システムは初期コストも大きく、加速器の信頼性を左右する要素となる。その必要電力も無視できないし、保守性に勝れた装置にしないと、機器の維持にも大きなコ

ストを要する。検討に当たっては、KEKにおける諸加速器の経験を踏まえた。特にKEKBは周長3kmのトンネルにおける消費電力が40 MW と、エネルギー密度においてはJLCと同等であり、ここで得られた経験をベースにして検討した。

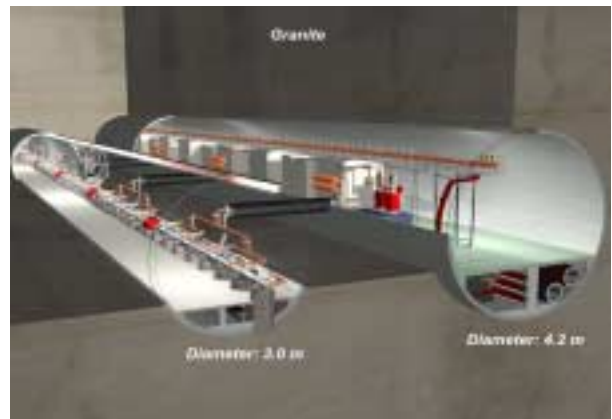


図1 トンネル概念図

## 2. 基本設計

### 2.1 概要

まず、冷却塔、ポンプ等の地上設備を一ヶ所にまとめるか、数km毎に分散配置するかを選択肢がある。我々は以下の理由で2km毎に10ヶ所の地上設備を設けることを想定した。実際の建設に際してはサイト固有の地形、アクセス等を考慮し、全コストを含めた詳細な最適設計を行う必要はある。(a) 300 MWの熱負荷を一ヶ所に集めるためには、トンネル内配管径が0.9mにもなり、建設コストを大きくする。(b) 建設時のトンネル温度は地中温度(サイトによるがだいたい10~15℃)と等しくなるが、運転時には冷却水の水温は50℃以上となり、配管の熱膨張がリニアック末端で4m以上にもなる。その吸収機構

<sup>1</sup> E-mail: ikeda\_ki@khi.co.jp

の設計は極めて難しい。

次に 10ヶ所に設置する 30 MW 対応の冷却水システムについて考える。1ヶ所の冷却水システムにより 200 台の加速ユニット全てを直接冷却する集中方式か、個々の加速器ユニットに一つの小型の冷却水システムを対応させ（一次冷却水）、プレート式熱交換器を用いて、大きな施設側システムを二次冷却水として用いる分散方式とするかを選択する。KEKB は集中方式である。我々は以下の理由で分散方式を選択する<sup>[2]</sup>。(a) 大きなシステムは配管保有水量が多く(500 トン程度になる) 起動時の安定化に時間を要し、加速器が部分的にトリップした場合の影響が全体に及ぶ。これは KEBK で経験していることである。(b) 図 3 に示すように、各加速ユニットにそれぞれプレート式熱交換器を用いた分散方式にすると、一次、二次冷却水が分離できる。一次冷却水（加速器側）は純水にする必要があるが、二次側（施設側）は一般水でよく配管、冷却塔、ポンプ等、大幅コスト削減となる。(c) ユニット毎に保守作業を行うことが可能となり、維持性能が向上する。

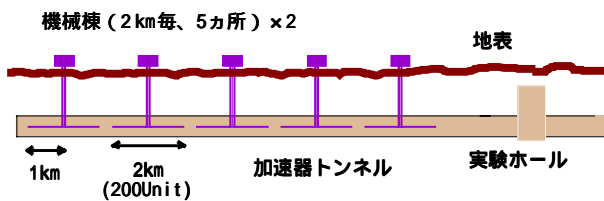


図 2 全体システム概要

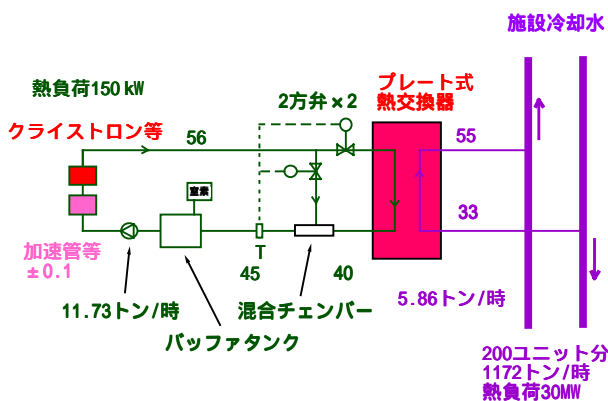


図 3 分散式冷却水ユニット

## 2.3 冷却水ユニット

図 3 に示す加速ユニットの冷却水システムは、熱負荷、ポンプ、プレート式熱交換器および温度制御システムから構成される。熱負荷を冷やし温度が上昇した冷却水はプレート式熱交換器により再び冷やされるが、温度を一定に保つため、熱負荷からの還り冷却水を 2 分割し、一部を熱交換器を通さずにバ

イパスさせる。その分割比を、バイパスした水と熱交換器を通った水を混合したあとの水温が一定になるように制御する。制御は二式の 2 方弁を 1 つのペアとして用いて行う。制御精度をよくするためには、二つの水路が交わる部分において、円滑に混合できるような工夫が重要である。

図 3 では熱負荷を  $\pm 0.1$  の精度で温度制御が必要な加速管を前段に置き、クライストロンを後段にシリーズに配置しているが、詳細は各機器の圧損を考慮して決める。図に示す流量、水温は熱負荷の合計が 150 kW のときの値である。

この装置とほぼ同様な装置を KEBK 用にこれまで 3 台製作し、既に 4 年の運転実績を持つが、何ら問題もなく安定に運転している<sup>[2]</sup>。なお、温度精度をさらによくしたいときは、負荷の前段に小型のヒーターを挿入し、わずかに温度を上げる方向で制御すれば  $\pm 0.01$  の精度も容易に達成できる。

## 2.3 冷却塔形式とヒートバランス

冷却塔を空冷、水冷却いずれにするかの選択について考える。空冷、水冷式冷却塔にはそれぞれ一長一短があり、またサイトにもよる。例えば、外気温度や補給可能な冷却水の量に依存する。水冷の場合、日量 2 万トンの冷却水補給能力がサイト条件となる。KEKB リングは主に密閉空冷式冷却塔にした。冷却効率は水冷式がよいが、保守に手がかかる。それに対し、空冷式は設置面積も大きく、外気温度が高いときの運転に支障を来すが、保守の観点からは優位である。最終的な決断はサイト決定時に行うべきだが、本稿では密閉空冷式冷却塔を用いる場合について検討する。

密閉空冷式冷却塔のサイズは設計空気温度によるので、コストはサイトの気象条件にも依存する。一つの目安として水戸気象台の 2000 年度日別最高気温をみると 28 以下の日数は 293 日間である。ここでは設計空気温度を 28 として検討を進める。ヒートバランスの観点から、循環水量を増やすと冷却塔面積を減らすことが出来る。冷却塔と循環系の両者に要するコストの和が最小になる点を求めると、循環水量は毎時 1172 トン、冷却塔伝熱面積は 80755  $m^2$  になる。冷却塔の出口温度は設計空気温度 28 + 5 の 33 とする。

加速ユニット毎の冷却水戻り温度は 56 になる。プレート熱交換器の出口温度は、この戻り温度から 1 低い 55 とした。加速ユニットへの行き温度は 40 となる。

## 2.4 冷却塔とプレート式熱交換器

冷却塔は送風機を伝熱部（フィンチューブ）上部に設置した空気吸込型にすると、フィンチューブに直接雨、雪が触れない為、安定した運転が可能になり、運転休止中も横風が伝熱部に当たらない為、ナチ

ユラルドラフトによる凍結の防止の一助となる。フィン及びチューブ材質は銅系統を採用するとコンパクトになる(フィン:C1100P、チューブ:C1220TS)。本設計では以下の諸元になる。

伝熱面積 80755 m<sup>2</sup>

設置面積 12.5×66.0 m (825 m<sup>2</sup>)

送風機 22 kW×26 台 (575 kW)

プレート式熱交換器は2000台も地下トンネルに設置するため高信頼性、軽量、コンパクト且つ高耐圧でなければならない。特に耐圧に関しては、地上設備と地下トンネルの高低差に相当する水圧(静圧)にポンプによる動圧をプラスした圧力に耐える必要がある。即ちこの耐圧がサイトの地形を決める大きな要素になるので注意が必要である。本設計では、SUSのプレートを99.9%の銅で溶着したBrazed Plate Heat Exchanger(M-25-80GG)を1ユニットに2台連結して用いることにした。プレート枚数は1台につき80枚、耐圧は3Mpaあり、外形寸法は2台連結した状態で200×329×1200mmとコンパクトで、要求性能を満たす。ポンプの吐出圧力を仮に0.5Mpaとすると、地上設備とトンネルの高度差は200m程度まで許される。

## 2.5 配管材搬入、設置、熱膨張対策、水質

工期短縮のため冷却水配管の搬入、設置はトンネル工事との協力が必須である。プレート式熱交換器の間隔が10mと均一であるため、配管の単位長さを10mの加工管として現場搬入するのが合理的である。日本の交通事情とも合致する。枝管等は全て工場で接続し、トンネル内工程をできるだけ減らすことは大切である。

配管施工は自動溶接機と非破壊検査装置をセットで用いて、設置、溶接、検査を繰り返しながら、トンネル施工と並行して実施することが望ましい。配管は後で延べるように3本となるので、トンネル直線部分において6000カ所の接続部がある。配管接続は水圧が高いので、リスク軽減のため、なるべくフランジ接続は避け、溶接接続とする。

トンネルにおける冷却水配管工事時の周辺温度は10~15と低い。加速器運転時には、冷却水行き管は33に、還り管は55になる。そのため配管は、最遠方端部(1km先)で数10cmも熱膨張して伸びる。その吸収方法としてベローズ、スリーブ等々あるが、狭いトンネル内での長期使用にはいずれも向かない。一つの方法は、10加速ユニット、100m毎を1サブセクションとし、100mの枝管を設けることである。サブセクション用の枝管と主管との接続には、フレキシブル継ぎ手をU字形に接続する。枝管側は固定して、主管の伸縮による分岐位置のずれをU字方フレキシブル継ぎ手で吸収する。

配管が往還2管のみでは、地上機械室からトンネ

ル内最遠端の負荷まで長距離配管となり、流量の均一化をバルブ制御だけで行なうのは難しい。KEKBではリバースリターン方式の実績がある。還り管は断熱が必要なので、リバースリターンにすると、断熱に必要な配管が2本となってしまふ。そのコスト減のためには、リバースサプライ方式がよい。

本計画ではプレート式熱交換器によりトンネル内の加速器冷却水(純水)と、地上施設を含む二次側冷却水とが隔離される。このため二次側(保有水量は500トンに達する)に一般水を利用できる。従って配管材料も低コストの亜鉛鍍金炭素鋼鋼管を使用できる。併せて近年開発が著しい、高分子分離膜、中空糸膜、気液分離膜等の膜を利用して冷却水の溶存酸素を脱気する方法が配管内防食に実績を上げてきているのでこの方法を採用すべきである。

純水系統も完全密閉式にし、バッファタンク兼用の膨張タンクを設け、窒素ガスで封じきる。純度維持のためデミナーを設け、また膜式の脱酸素装置も組み込む。

## 3. コスト

プレート熱交換器から加速器側は加速器の一部の機器として設計することが、一元的で望ましいと考える。コストも加速器の一部とする。その上で施設側の全体のコストを1とする。そのうち配管コストは48%を占める。次いで、冷却塔、ポンプ等の機器が29%、自動制御装置が17%となる。その他、排水設備、水抜き配管、機械室配管等が6%である。したがって、コスト削減のためには、配管コストを如何に節減するかが最重要課題となる。

## 4. まとめ

机上設計であるが、C-band JLCの場合について、冷却水システムの設計を行った。机上とはいえ、ファクトリーマシンとして稼働中のKEKBの経験をベースにし、また加速器の冷却水ユニットも、既にKEKBに3台導入し、長期間運転の実績を積んでいる。従って、基本的な部分はリアリティーがあると考えられる。一方、気象や地形により設計を変更しなければならない部分もあるので、サイトが決定した段階で再度調整しなければならない。

## 参考文献

- [1] 新竹積、他、"CバンドRF加速器開発の現状" Proceedings of the 26<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2001
- [2] M. Yoshioka et al., "DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE CONTROL SYSTEM FOR LARGE SCALE ELECTRON-POSITRON COLLIDERS", Proceedings of the First Asian Particle Accelerator Conference, KEK, Tsukuba, Japan, March 23-27, 199

