

- ① Pool Cooling
- ② Forced Cooling --- {
 - ③ 2 phase flow (Liquid + Gas)
 - ④ Supercritical He flow (Mono-phase flow)

①の pool cooling は冷却の最も原始的な方式であり、SC magnet の冷却は magnet の形状、Cooling channel、冷却物質の特性等によって決まります。それに反し ②の強制冷却は冷却物の Reynolds No. によって決まり、magnet の内部まで冷却が可能となり、magnet 動作電流と Short sample の I_{cl} と極めて近くなることも可能である。②の強制冷却には通常の液体ヘリウムを 270°で循環させる方式 (2 phase flow) と Supercritical He flow によるものが 2通りある。2 phase flow は magnet からの熱により液体ヘリウム中で気泡を生じて 2流体となることで、流速一定ならば冷却力が大きくなることもできる。また SC より Liq. He への heat flux は 0.8 W/cm^2 の最大値を持ち、それ以上では急速に SC の温度上昇をきたし、通常 SC の環境を招く。Supercritical Helium は mono-phase の超臨界流体であり、液体ヘリウムに見られるような沸騰現象がない。また大きな比熱の山を持つことから確実に冷却を期待することもできる。CERN の OMEGA Magnet はこの方式によるものであり、電流密度の高いパルス用 Hollow Conductor が完成すれば、この方式が採用されるであろう。またこの mono phase による強制冷却は、pool cooling に比べて magnet 内の液体ヘリウムの量が少なく、magnet quench 時の大量のヘリウムガスの処理に悩まされることはない。

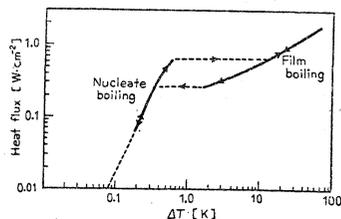


図3 液体ヘリウムの heat flux.

図4に各種の冷凍方式を图示した。2K の冷凍には LHe と真空ポンプで減圧する方式 (iv) と Ejector Pump (v) による方式との 2通りが考えられる。(iv) は大容量の真空ポンプを必要とし He 圧縮機と同程度の動力を要する。(v) の Ejector Pump は動力源が Ejector を流れるガスの運動エネルギーであり、外部から動力を必要としなくなり利便がある。

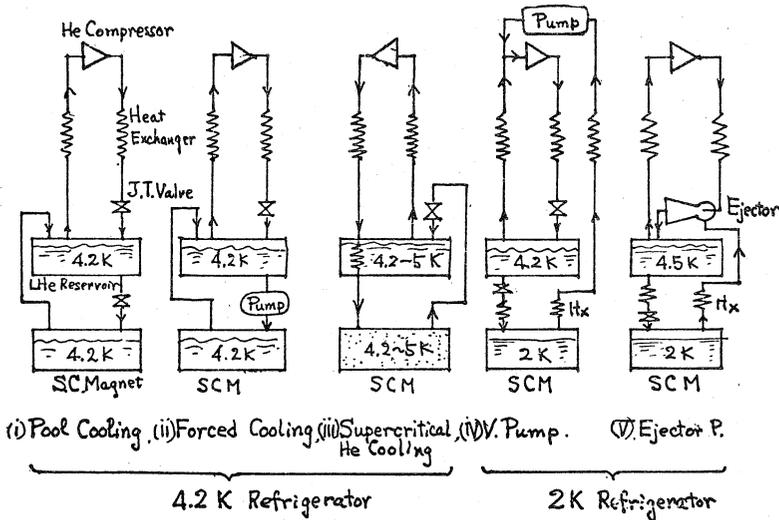


図4 各種の冷凍方式

4. シンクロトロンのマグネットの冷却

シンクロトロン用パルスマグネットの損失は万磁 1 サイクル、マグネット長 1m をり約 75~150 Joules である。その内訳は表-1 に示す通りであり、大部分が SC multifilaments の magnetization loss である。シンクロトロンは 1 サイクルを 10 秒程度で行うのでこの場合の熱損失は表-2 のようになる。

① SC フィラメント中の損失	50~100 Joules
② Cu 母体中の損失	10~20
③ Self field 損失	0~10
④ 鉄ヨークの損失	10~20
全マグネット損失	75~150 J

表-1 1 サイクル当りの損失 (マグネット 1m 当り) SC Magnet

SC magnet の損失は magnet の AC loss ① の他に Eddy Current loss, ②, 外部より
 のフック射線等の熱流入③, magnet に電流を供給する Current leads ④, 粒子による加熱⑤,
 冷凍機 - マグネット間の Transfer line に流入する熱⑥ 等があり 10秒サイクルに対し
 18~31 Watts/meter (at 4.2K) とする。この冷
 却には表2の値を用いると常温での冷凍機の入力は
 5.4~9.3 KWH と大きな値になる。

① マグネット損失	7~15 Watts
② その他のEddy current 損失	1~2
③ クライオスタット熱損失	2~3
④ 電流リード線による損失	6
⑤ 粒子による加熱	1
⑥ 冷凍機 - マグネット間の熱損失	2~4
全 損 失	18~31 Watts/m at 4.2K

表2-2 10秒サイクルに対する損失

5. TRISTAN p-p リングの冷却

TRISTAN 計画の p-p Ring は平均直径648mであり、このリングに2つの proton ring
 を持つ。

リングを4つの Super period を持つとすれば
 冷凍機は4台+1台(for Emergency operation) と
 するのが安全の観点から安全である。冷凍機は
 SC magnet が Cold Iron であることと考之ると
 その Cool down のために 80K, 20Kでの冷却
 イレを持つことが望ましく、従って Transfer Tube
 の内径は4Kの定常冷却設備にて大きくとって
 必要がある。

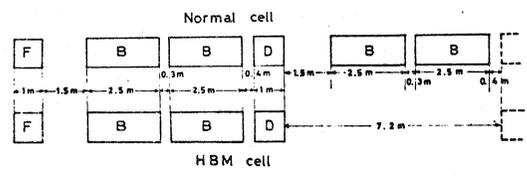


表5 図 CELL STRUCTURE FOR PP RINGS (TRISTAN)

表5図に Cell structure を示す。SC magnet の電流が 3000~5000 Amp. であり、また
 のリード線からの熱流入が 1 mW/Amp. 以上であることを考之ると、BBD 又は BFF とする
 のリングに1組のリード線を使用すべし。(この場合 Bending と Quadrupole magnet とは同じ電
 流で動作するよう設計)。これにより 冷凍機の負荷を大きく低減することになる。Acceleration
 Time が 150 sec. であることからこのような条件下での冷凍機の置荷は次のようになる。

$$\begin{aligned} \text{Effective magnet length (Dipole+Q)} &= (6 \times 2) \times 68 \times 2 \text{ rings} = 1,632 \text{ m} \\ \text{(loss of magnet)} & 150 \text{ cycle} / 150 \text{ sec} \times 1,632 = 1,632 \text{ W} \\ \text{(その他の Heat load)} & 16 \text{ W/m} \times 1,632 = 26,112 \text{ W} \\ \hline \text{Total} & 27,744 \text{ W at 4.2K} \\ & 8.3 \text{ MW at 300K} \end{aligned}$$

8.3 MW とする冷凍機は1台あたり 2 MW ということを考之ると、これは CERN の BEBC の
 冷凍機と丁度同能力であり、信頼性の裏からも問題はなく、実現が容易である。問題の冷却効
 果のすぐれた安全な SC magnet とその冷却システムの実現であり、これが超電導シフト
 ロングの完成への大きな力となる。