超電導発電機の回転子における液体ヘリウムの 流動形態の遷移現象（第1報）可視化実験

吉村 秀人, 長尾 政志

三菱電機（株）中央研究所 尼崎市塚口本町 8-1-1

(1987年9月28日受理)

Flow Pattern Transition of Liquid Helium in the Rotating Helium Pool of
Superconducting Generators (First Report) Visual Experiment

Hideto YOSHIMURA and Masashi NAGAO

Central Research Laboratory, Mitsubishi Electric Corp., 8-1-1 Tsukaguchi-honmachi, Amagasaki 661

(Received September 28, 1987)

Synopsis:

It is important for superconducting rotors to maintain a stable flow pattern of liquid helium to prevent an accidental transition of superconducting field windings into the normal state. Liquid helium within the rotating helium pool of superconducting rotors has two major flow patterns. One is a gravity dominant flow pattern and the other is a centrifugal force dominant flow pattern. The former has a flat horizontal surface of a liquid, and on the other hand the latter has a cylindrical one. This paper describes the transition phenomena between these two flow patterns. The results of a visual experiment using water, from 113 and silicon oil are presented in the first report of this paper.

1. はじめに

超電導発電機において回転子の界磁コイルの安定な冷却を確保することは最重要課題の一つである。すなわち超電導発電機の界磁コイルは回転ヘリウム槽内の液体ヘリウムに浸漬されて冷却されるから、励磁中に界磁コイルがヘリウムの気相中に露出すると、コイルの冷却が不十分となり超電導破壊（クエンチ）を生じる危険性がある。クエンチが生じると発電機の発生電圧が失われるので一種の事故となる。したがって、このクエンチを防止するために界磁コイルを確実に液体ヘリウムの中に浸漬させ、十分な冷却を確保する必要がある。

さて回転ヘリウム槽内の液体ヘリウムの流動形態は、液体ヘリウムに働く外力の種類に応じて、大きく分けて2種類存在すると考えられる。すなわち回転子の回転数が十分小さい場合には、液体ヘリウムは重力の影響を強く受けて水平な液面を保つと考えられる。この流動形態を重力支配型と呼ぶ。一方、回転子の回転数が十分高い場合には遠心力の影響が大きくなり、液

体ヘリウムは回転子とともに回転し、回転中心軸のまわりに円筒状の液面を保つと考えられる。この流動形態を遠心力支配型と呼ぶ。もし界磁コイルの励磁中にヘリウムの流動形態が重力支配型へ遷移したり、流動形態が重力支配型のときに界磁コイルを励磁すると、界磁コイルが気相中に露出する可能性が生じる。したがって超電導発電機を設計あるいは運転する際には、

- 1) 流動形態の遷移回転数（重力支配型の流動形態から遠心力支配型の流動形態への遷移およびその逆の遷移をひきおこす回転数）
- 2) 遷移回転数前後の流れの様子

を正確に把握して、界磁コイルが励磁された状態で気相中に露出することのないようにすることが重要となる。

ところで回転円筒内に部分的に封入された液体の流動形態については、回転するロケット内の液体燃料の挙動^{1,2)}、部分的に液体で満たされた回転軸の自励振動³⁻⁹⁾、および回転ヒートパイプ¹⁰⁾等に関連して数多くの研究が存在する。しかしこれらの研究の大部分は遠心力支配型の流動形態における自由表面波に関する

ものであり、遠心力支配型の流動形態と重力支配型の流動形態との間の遷移に関する研究は少ない。二、三の論文^{1,10)}がこの遷移を扱っているが、これらには

- 1) 実験に用いた回転円筒の直径が超電導発電機の回転ヘリウム槽の直径に比べて小さいことや、液体ヘリウムの実験結果がないことのために、結果を超電導発電機の設計に適用できるかどうかは不明である。
- 2) 回転円筒内に液体の流動を妨げる構造物（以下、羽根と呼ぶ）がある場合の理論的ないし実験的な結果が存在しない。

等の問題点があるために超電導発電機の設計資料としては不十分であった。

そこで本研究では上記の問題点を解消し、超電導発電機の設計資料として十分な実験データを得ることを意図している。

本研究の第1報ではまず、常温で取扱いの容易な液体（フロン113、水、シリコン油：以下常温液体と呼ぶ）を用いた可視化実験について述べる。ついで第2報では超電導発電機の回転ヘリウム槽を模擬した回転クライオスタットを用いて行った液体ヘリウムの実験について述べ、本報の結果と比較する予定である。

2. 実験装置と実験方法

Fig. 1, Fig. 2にそれぞれ可視化実験における装置の概念図および写真を示す。透明なアクリル樹脂で製作された回転容器の一端に駆動軸が取り付けられ、この両者が三つの軸受によって支持されている。駆動軸の他端には可変速の駆動モータが結合されており、回転容器の回転数を0 rpm から1,200rpm までの範囲で制御することができる。回転数の測定はデジタル回

Fig. 2 Photograph of test rig.

Fig. 3 Schematic of vane configuration.

転計によって行った。回転容器の反駆動側の端面には液体の給排口および液面位置を測定するためのスケールが取り付けられている。また回転容器の内部にはFig. 3に示すような形状の羽根（アクリル樹脂製）が取り付けられる場合もある。

実験は次の順序で行った。まず回転容器が静止した状態で回転容器内に液体を入れる。ついで回転容器の回転数をゼロから徐々に高くして、流動形態が重力支配型から遠心力支配型に遷移する回転数をもとめる。さらに遠心力支配型の流動形態の状態から回転数を徐々に低くして、流動形態が遠心力支配型から重力支配

Fig. 1 Test rig schematic.

Fig. 4 Flow pattern transition without vanes.

型に遷移する回転数をもとめる。なお回転容器内の液体の量の測定は、流動形態が遠心力支配型のときに液面位置をスケールで読むことによって行った。以上の測定を以下のパラメータを変化させながら行った。

- 1) 封入する液体の量
- 2) 封入する液体の種類 (フロン 113, 水, シリコン油の 3 種類)
- 3) 回転容器の内径 (196 mm と 290 mm, 長さは 316 mm に固定)
- 4) 羽根の枚数 (0 枚, 2 枚, 3 枚, 4 枚)

なお液体の種類としてフロン 113, 水, シリコン油を用いた理由は, 取扱いの容易さに加えて, 流動形態の遷移回転数に強く影響すると思われる粘性係数のレンジを広くとるためである。

3. 実験結果

3.1 羽根が存在しない場合

羽根が存在しない場合の流動形態の遷移の概念図を Fig. 4 に示す。回転数が十分低い場合には液面の形状は水平である (図中の(1))。回転数が高くなるにしたがって回転方向へ液面がもち上り (図中の(2), (3)), ついに液体の飛沫が落ちるようになる (図中の(4))。さらに回転数が高くなると液体は回転容器の壁面に張りつき, 円筒状の滑らかな液面を形成する (図中の(5))。これ以上回転数を高くしても流動形態は変化しない。本実験では図中の(4)の状態から(5)の状態へ変化する回転数を加速時の遷移回転数としている。

回転数を低くして加速時の遷移回転数にしても流動形態には変化は生じない (図中の(7))。さらに回転数を下げると滑らかだった円筒状の液面に波動が生じ始める (図中の(8))。この波動は回転数の低下とともに振幅が大きくなり, ついには円筒状の液面が突然崩れ

て, 水平な液面に復帰する (図中の(9))。本実験ではこのときの回転数を減速時の遷移回転数とした。減速時の遷移回転数は加速時の遷移回転数と比べるとずっと低い。流動形態の遷移は回転数に対してヒステリシスを示すといえる。

Fig. 5 に加速時の遷移回転数の実験値を無次元表示で示す。ただし

Fr : フルード数 (遠心力と重力との比を意味する)
 $(\equiv a\omega^2/g)$

a : 回転円筒の内半径 (m) (内径の 1/2)

ω : 遷移回転数に対応する角速度 (s^{-1})

g : 重力加速度 ($9.8 m/s^2$)

c : 液体の封入量のパラメータ ($\equiv r/a$)

Fig. 5 Critical rotating speed during acceleration without vanes (I).

r : 遠心力支配型の流動形態になった場合における液面の半径 (m)

である。この図から加速時の遷移回転数の無次元表示 Fr は、 c だけではなく流体の物性値にも関係していることがわかる。Fig. 6 はガリレオ数 Ga を用いて実験データを再整理した図であり、Table 1 にこの際に使用した各液体の物性値を示す。ただし、

Ga : ガリレオ数 (重力と粘性力との比を意味する)

$(\equiv \rho^2 g a^3 / \mu^2)$

ρ : 密度 (kg/m^3)

μ : 粘性係数 ($\text{Pa}\cdot\text{S}$)

である。Fig. 6 から加速時の遷移回転数は次の実験式でよく整理されることがわかる。

Fig. 6 Critical rotating speed during acceleration without vanes (II).

Fig. 7 Critical rotating speed during deceleration without vanes.

$$Fr = 17.0 \times \left(\ln \frac{1}{c} \right)^{0.63} \times Ga^{0.092} \quad (\text{加速時の遷移回転数}) \quad (1)$$

Fig. 7 に減速時の遷移回転数の実験値を無次元表示で示す。この図から減速時の遷移回転数の無次元表示 Fr は、流体の物性値にはあまり依存せず、若干のばらつきはあるものの c のみの関数、すなわち

$$Fr = 16.0 - 12.4 \times c \quad (\text{減速時の遷移回転数}) \quad (2)$$

で整理されることがわかる。Fig. 7 を前述の Fig. 5 と比較すると加速時の遷移回転数は減速時の遷移回転数よりも高いことがわかる。

なお文献 10) に示されたデータと本実験で得られたデータを比較すると、データのばらつきの範囲内で両者はよく一致している。

Table 1 Principal properties of liquid (10°C).

	Density ρ (kg/m^3)	Viscosity μ ($\text{Pa}\cdot\text{S}$)	Galileo No. $Ga \equiv \frac{\rho^2 g a^3}{\mu^2}$
Fron 113	1,570	0.76×10^{-3}	3.9×10^{10} ($a=98 \text{ mm}$)
Water	1,000	1.3×10^{-3}	3.7×10^{10} ($a=145 \text{ mm}$) 0.55×10^{10} ($a=98 \text{ mm}$)
Silicon oil	950	28×10^{-3}	1.1×10^7 ($a=98 \text{ mm}$)

3.2 羽根が存在する場合

羽根が存在する場合の流動形態の遷移の概念図を Fig. 8 に示す。図に示すように加速時の遷移と減速時の遷移は可逆的であり、羽根がない場合に見られるようなヒステリシスは存在しない。また流動形態の変化は回転数の変化に対して連続的に生じ、羽根がない場合に見られたような明確な遷移回転数は認められなかった。したがって本実験では円筒状の液面に液体の飛沫が観測できなくなる回転数あるいは液体の飛沫が観測され始める回転数（両回転数は一致する）を遷移回転数と定義した。

Fig. 8 Flow pattern transition with vanes.

Fig. 9 Critical rotating speed with vanes.

Fig. 9 は羽根が存在する場合における流動形態の遷移回転数の実験値の無次元表示を示す。実験値は液体の種類および羽根の枚数によって若干のばらつきが見られるもののほぼ次式で整理できる。

$$Fr = 70 \times (0.07)^c \quad (3)$$

この結果から羽根が存在する場合の遷移回転数は羽根の枚数や液体の粘性にはほとんど依存しないことがわかる。また Fig. 9 を Fig. 5 と比較すると羽根が存在する場合の遷移回転数は羽根が存在しない場合における加速時の遷移回転数より小さくなるがわかる。これは羽根が加速時の遷移回転数を下げる効果を

有していることを意味している。

4. 超電導回転子への適用性について

本節では前節で得られた遷移回転数の無次元式を例として30MVA 超電導同期調相機^{11~14)}（以下30MVA 機と呼ぶ）の回転子に適用して、回転ヘリウム槽内における液体ヘリウムの流動形態を推定する。

Fig. 10 に30MVA 機の回転子の断面を示す。30 MVA 機の回転子では、内径 520mm のヘリウム槽内にコイル取付け軸があり、これに界磁コイルが取り付けられている。そしてコイル取付け軸の中心部には内径 280 mm のボアがあり、これは液体ヘリウム溜りとなっている。ボアの内部には4枚の羽根が入っている。定格回転時 (3,600 rpm) にはヘリウムの液面が内径 180 mm の円筒になるように設計されている。

Fig. 10 Cross section of the rotor of 30 MVA machine.

さて羽根がある場合の遷移回転数は加速時および減速時とも同じであり、この値は(3)式を用いて約450rpmと計算できる。このことから30MVA 機の回転子の場合には450rpm以上では界磁コイルが気相中に露出する恐れはないことが予想される。もしボア内部の羽根をなくした場合の遷移回転数は(1)式および(2)式を用いて、加速時に約1,200 rpm、そして減速時に230 rpmと計算できる。羽根の存在が加速時の遷移回転数を低くし、流動形態を速やかに遠心力支配型に遷移させる効果があることがわかる。

5. む す び

超電導発電機の回転子における液体ヘリウムの流動形態の遷移現象を明らかにすることを意図して、常温流体（フロン113、水、シリコン油）を用いた可視化実験を行った。得られたおもな結論は次のとおりであ

る。

- 1) 羽根が存在しない回転円筒の場合には加速時の遷移回転数は減速時の遷移回転数よりも高い。この場合のそれぞれの遷移回転数は次の無次元式で整理できる。

$$Fr = 17.0 \cdot \left(\ln \frac{1}{c} \right)^{0.63} \times Ga^{0.092}$$

(加速時の遷移回転数)

$$Fr = 16.0 - 12.4 \cdot c$$

(減速時の遷移回転数)

- 2) 羽根が存在する回転円筒の場合には、加速時の遷移回転数と減速時の遷移回転数とが等しくなり、この遷移回転数は次の無次元式で整理できる。

$$Fr = 70 \times (0.07)^c$$

この場合の遷移回転数は羽根が存在しない場合の加速時の遷移回転数に比べて小さい。

- 3) 超電導発電機の回転子において、羽根は加速時の遷移回転数を下げるのに有効であることが推定される。

参 考 文 献

- 1) O. M. Phillips: J. Fluid Mech. 7 (1960) 340
- 2) J. W. Miles and B. A. Troesch: Trans. ASME E83 (1961) 491
- 3) F. F. Ehrich: Trans. ASME B89-4 (1967) 806
- 4) J. A. Wolf, Jr.: Trans. ASME E35-4 (1968) 676
- 5) M. J. Karweit and S. Corrsin: Phys. Fluids 18 (1975) 111
- 6) 齊藤 忍, 染谷常雄: 日本機械学会論文集 44-388 (1978) 4115
- 7) 齊藤 忍, 染谷常雄: 日本機械学会論文集 44-388 (1978) 4123
- 8) 金子成彦, 葉山真治: 日本機械学会論文集 C49-439 (1983) 370
- 9) 金子成彦, 葉山真治: 日本機械学会論文集 C49-439 (1983) 381
- 10) 大塚吉則, 中山 恒, 吉川次雄: 日本機械学会論文集 B50-457 (1984) 2162
- 11) 岩本雅民, 中村史朗, 山田忠利, 吉岡純夫, 大石紀夫, 岡本紘一, 藤野治之, 石原 昭, 新藤義彦: 電気学会論文誌 B104 (1984) 773
- 12) 岩本雅民, 吉村秀人, 荻野 治, 小寺滋男, 中村史朗, 藤野治之, 石原 明, 植田和雄: 電気学会論文誌 B105 (1985) 371
- 13) 岩本雅民, 中村史朗, 山田忠利, 野村達衛, 吉村秀人, 藤野治之, 石原 昭, 新藤義彦: 電気学会論文誌 D107 (1987) 511
- 14) 岩本雅民, 吉村秀人, 山田忠利, 小寺滋男, 中村史朗, 藤野治之, 石原 昭, 植田和雄, 新藤義彦: 電気学会論文誌 D107 (1987) 525