HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	液体水素冷却抵抗ケーブルによる大容量送電の可能性
Author(s)	瀬古, 一行; 酒井, 洋輔; 田頭, 博昭
Citation	北海道大學工學部研究報告, 116, 39-50
Issue Date	1983-10-31
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/41813
Type	bulletin (article)
File Information	116_39-50.pdf

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

北海道大学工学部研究報告
第116号（昭和58年）

Bulletin of the Faculty of Engineering,
Hokkaido University, No. 116 (1983)

液体水素冷却抵抗ケーブルによる大容量送電の可能性

瀬古一行　酒井洋輔　田頭博昭

（昭和58年6月30日受理）

Feasibility Study on Bulk Power Transmission by Liquid-Hydrogen-Cooled Resistive Cable

Ikko SEKO, Yohsuke SAKAI, Hiroaki TAGASHIRA

(Received June 30, 1983)

Abstract

The feasibility of bulk power transmission by a liquid-hydrogen-cooled cryogenic resistive cable was studied. The importance of the study lies in the fact that liquid hydrogen, which has the second lowest boiling temperature, has considerable advantage with respect to price, amount and distribution of resources, cooling ability, and electrical properties in comparison to liquid helium and liquid nitrogen. After mentioning the cable construction now being planned and its various kinds of transmission losses, the temperature rise (ΔT) of the flowing coolant liquid along the cable axis and the total transmission loss were calculated.

The temperature rise (ΔT) was found to depend essentially on the value of thermal conductivity of the insulating material used between the go- and the return-stream of liquid hydrogen. The value of the transmission loss of the cable was shown to be almost the same as that of compressed gas insulated cables. However, if the diameter of a conductor element is chosen as thin as possibb so that the eddy current loss in the conductor can practically be neglected, the loss of the present cable will become minimized among various types of cables in the capacity range between 4 GVA and 8 GVA. The results strongly suggest the feasibility and the importance of furthering the study of liquid-hydrogen-cooled cryogenic cables for high density, minimum loss electric power transmission.

1. 緒　　論

近年，大都市における電力需要密度の増加に伴い，従来の超高圧架空送電方式（誘導障害，塩じん害，広い空間を占有する等の欠点をもつ）や，地中送電ケーブル（現在容量の最大はOFケーブルでも1000 MVAが限界[1]）に代って，極低温や超電導による高エネルギー密度，低損失送電方式の研究が行なわれている[2]。極低温ケーブルは，高純度の銅やアルミニウム等の導体材料を冷却し，その抵抗率を大幅に減少させ，送電損失の低下と送電エネルギー密度の増加を狙ったものである。現在，冷媒としては液体窒素を用いることが計画されている[2]。しかし，冷却温度

電気工学科　電気応用工学講座

は約77Kであり，導体抵抗率の減少は必ずしも大きくはない。一方，超電導送電方式は，Nb_3Sn等の金属を液体ヘリウム温度まで冷却するとその電気抵抗が零になることを利用し，高密度，低損失送電を行うものである。しかし，冷媒としてのヘリウムは，現在限られた地域，例えば米国中西部，で生産される天然ガスに高濃度に含まれているものを分離して供給されているもので，1990年代には米国内の生産量と需要が平衡するという予測もあり，将来工業的に大量に使用された場合の安価，安定供給という点には多くの不安が残る[3]。

以上の理由から，本論文では，極低温送電方式の冷媒として，液体水素を取り上げ，これの使用の可能性について検討する。液体水素は液体ヘリウムの次に温度の低い液化ガス（三重点14K，沸点20.4K）で，冷却能力や電気的性質（電気的絶縁破壊強度，誘電体損失等）は液体ヘリウムや液体窒素よりも優れている。また，将来に亘って低価格，安定供給が期待出来る。しかし，爆鳴気の形成や金属材料の水素脆化といった安全性に対する問題がある。本論文では，この安全性を考慮しつつ，液体水素冷却ケーブルの概念設計を行い，ケーブル内の上昇温度分布や送電損失を計算する。その結果をもとに，本送電方式と他の方式の経済性，有利性等について比較検討する。

2. 液体水素の熱及び電気的特性

2-1 比熱，潜熱，顕熱[4]

液体水素の比熱は，液体ヘリウムの2倍程度，液体窒素の5倍程度大きい[4]。液体水素，液体ヘリウム，液体窒素の沸点における蒸発潜熱は，それぞれ500，25，200J/g，顕熱（気体の室温におけるエンタルピーと沸点における値との差）はそれぞれ3500，1540，234J/gとなり，液体水素のそれらが圧倒的に大きい。即ち，液体水素の冷却能力は他の2液体に比べて優れていることになる。

2-2 電気絶縁耐力，誘電体損[4]

多くの冷媒の電気伝導度は良質の絶縁体のそれと同程度である。100V以下の電圧では，液体水素や液体窒素のそれは$10^{-17}/\Omega\cdot m$，液体ヘリウムでは約$10^{-13}/\Omega\cdot m$である。

誘電体損（$\tan\delta$）も良好な絶縁体と同程度に小さい。液体ヘリウムでは50Hzで3×10^{-5}，液体水素と液体窒素では，更に小さい[4]。

絶縁破壊強度は，液体水素と液体窒素では良質の絶縁油と同程度，液体ヘリウムではそれの数分の1の値をとる。

3. ケーブルの構成

本設計では，第1図に示すような断面をもつ対称3芯タイプのものを採用する。各構成の詳細については，次に述べる。

3-1 導体系

高純度の銅やアルミニウムの抵抗率は，第1表に示されるように低温では大幅に減少する[5]。しかし，導電率が急増するために常温ではあまり問題にならなかった磁気抵抗効果及び表皮効果の影響が必ずしも無視出来なくなる。磁気抵抗効果とは，導体が磁界にさらされると実効電気抵抗が増加する効果を称するが，しかし極低温ケーブルで取り扱う電流によって発生する磁界程度では，それ程大きいものではない[6]。これに対し，表皮効果は著しく大きく現れ，これを無視することはできない。表皮の深さδ（cm）は次式から計算される。

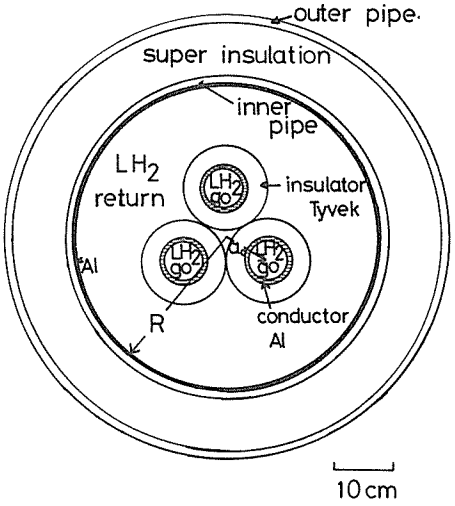
第1表　低温における金属の比抵抗

材料	不純物量 ppm	Ωcm 4.2°K	20.4°K	77°K	195°K	273°K	$\rho_{273°K}/\rho_{4.2°K}$	$\rho_{273°K}/\rho_{20.2°K}$
銅① 反射炉材	164	8.01	9.19	206	1030	1670	202	176
銅② 2重電解	<57	0.884	1.93	194	1010	1590	1810	901
銅③ 2重電解 エレクトロンビーム	<12	1.11	2.42	195	1000	1590	1430	771
銅④ 2重電解 ゾーン・メルト	< 6	0.336	1.11	192	996	1580	4710	1550
アルミニウム 99.7%	<1860	87	94.2	341	1630	2460	28.3	28.6
アルミニウム 99.9%	1327	43.9	46.3	270	1620	2420	55.2	57.1
アルミニウム 99.99%	56	5.75	7.66	224	1500	2300	400	328
アルミニウム 99.999%	9	1.11	2.38	221	1440	2460	2210	1130

$$\delta = 1/2\pi \cdot (\rho/f)^{1/2} \qquad (1)$$

ここで，ρ は導体の抵抗率（nΩ・cm），f は周波数(Hz) である。例えば，99,99% 純度のアルミニウムでは $\delta \simeq 0,07$ cm となる。

導体系を設計する上には，更に渦電流損失の低減を考えなければならない。渦電流損失と表皮効果による損失を減ずるために，現在，主要電線会社の試験装置には直径 2 mm の電気絶縁の施された細線を束にしたものが用いられている[2]。



第1図　本設計に採用した液体水素冷却ケーブルの断面図

3-2　電気絶縁系[7-10]

液体水素はそれ自身でも良い電気絶縁物である。しかし，他の冷媒と同様，tanδ が電界強度の増加に伴い増加する性質をもつために，液体水素のみで電気絶縁を行うことが困難であると考えられる。現在，液体ヘリウムや液体窒素を冷媒として用いた極低温ケーブルでは，ポリエチレン，ポリ塩化ビニル，セルローズトリアセテート，ナイロン等の固体絶縁物[7-9]や，ポリエチレン紙，ノーメックス紙，Tyvek 等の冷媒含浸紙[10]の使用が試みられている。

3-3　保護層，断熱層

極低温ケーブルでは，外力からのケーブルの保護や熱絶縁の目的から，パイプを二重構造にしその間に断熱層を設ける形が一般的である。パイプの材質としては，低温及び水素脆性に強いオーステナイト系ステンレスを用いる。

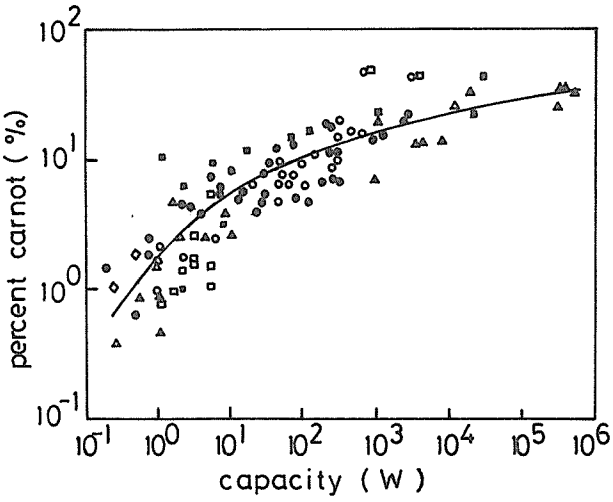
断熱方式としては，スーパ・インスレーション（アルミ箔又はマイラを熱シールドとし，シールド間に極めて細い繊維により成るグラスウールをサンドイッチ状に重ね高真空にする）を採用する。この方式では，現在熱伝導率が $1,16\times10^{-7}$ W/cm・K 程度[11]にまで減少している。

3-4　冷却系

導体損を始めとする各種損失によって発生した熱は，冷媒に受け継がれた後，数 km 毎に設けられた冷凍ステーションにおいて除去される。それに必要な電力 P_W (W) は[2]，

$$R_W = (T_H - T_L)/T_L \cdot 100/P_C \cdot Q \qquad (2)$$

ここで，T_H，T_L はそれぞれ室温と動作温度 (K)，P_C はパーセントカルノー値[2]，Q はケーブルの損失電力と外部侵入熱との和 (W) である。冷凍機のパーセントカルノー値を第2図に示す。



第2図 パーセントカルノー値

4. 送 電 損 失

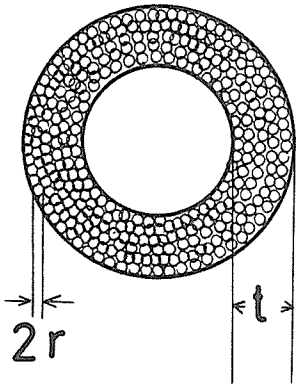
4-1 導体損

高導電率をもつ導体では，表皮効果による実効抵抗の増加に伴う損失や渦電流損が無視出来ない。表皮の深さ δ より細い細線の束を導体として用いれば，導体損 W_C (W/cm) は次式のように書ける。

$$W_C=\rho J^2 S(1+P_e)^{6)}, \qquad (3)$$

$$P_e=W_e/W_C=1/3\cdot(K\cdot t\cdot r/\delta^2)^{2\ 6)}, \qquad (4)$$

ここで，ρ は導体の固有抵抗 ($\Omega\cdot$cm)，J は電流密度 (A/cm^2)，S は導体断面積 (cm^2)，P_e は渦電流損失率，W_e は渦電流損 (W/cm)，K は占積率，t, r は第3図に示すようにそれぞれ導体の厚さ，素線半径，δ は表皮の深さ (cm) である。



第3図 導体断面図

電流値一定の場合，W_c は導体断面積が大きい程 (3) 式の第1項は小さくなるが，第2項が S とともに増大するため，ある S の値で最小値をもつ。しかし，この値は非常に大きく，実用上このことを考慮する必要はない。

4-2 誘電体損

誘電体損 W_D は，次のように与えられる。

$$W_P=2\pi fC\frac{E^2}{3}\tan\delta\times10^{-5} \quad (\mathrm{W/cm}) \qquad (5)$$

ここで，f は周波数 (Hz)，E は線間電圧 (kV)，C は静電容量 (μF/km)，$\tan\delta$ は誘電正接である。ケーブルの C は，誘電率 ε，絶縁物の外径及び内径それぞれ d_1, d_2 (cm) を用いて，

$$C=\frac{\varepsilon}{18\ln(d_2/d_1)} \quad (\mu\mathrm{F/km}).$$

4-3 パイプ損

パイプ損はパイプに発生する渦電流によって生ずる。これは次式により与えられる[13]。

$$W_P=140\left(\frac{a_0}{1-(a_0/R)^2}\right)^2\frac{\rho I^2}{\delta R^3}\times10^{-6} \quad (\mathrm{W/cm}) \qquad (6)$$

ここで，第1図に示してあるように，a_0 は正三角形配置の各導体の中心からパイプの中心までの距離 (mm)，R はパイプ半径 (mm)，δ は表皮の深さ (mm)，I は線電流である。

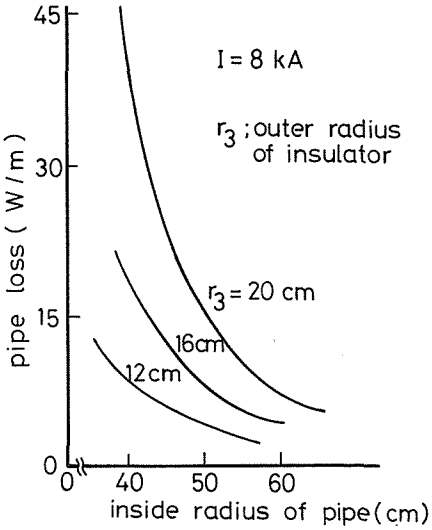
パイプ材料としては，低温及び水素脆性に強く，構造材としての強度を備えたステンレス鋼が好ましい。しかし，本材料のパイプ損失は大きい。3芯タイプでは，アルミ内張りステンレスパ

イプが望ましいことが報告されている[2)]。本設計例では，内張り材料として 99.99%純度のアルミニウム材を用いることとし，その厚さを，表皮の厚さ 0.63mm を参考にし，1mm とした。

パイプ損失の計算例を，パイプ内径の関数として，第4図に示す。

従来の極低温ケーブルの設計例では[2)]，パイプ損と外部からの侵入熱の和は導体損の約40%程度である。本設計ではパイプ損を導体損の30%にとった。その結果パイプ内径が50cmになる。

補強層にも損失が発生するが，一般に無視出来る程度に小さい。例えば，SUS 304 を使用した場合，導体損の 1.3×10^{-9} 倍程度でしかない。



第4図　パイプ内径に対するパイプ損失

4-4　摩擦損

管路に流体が流れるとき，摩擦によって圧力損失が発生するが，これは熱となる。摩擦損 W_F は，

$$W_F=\frac{\pi}{40}D^2v\frac{\partial P}{\partial x}\qquad(\mathrm{W/cm})\tag{7}$$

ここで，D は“4×管路の断面積／管路の縁の長さ”として定義されている代表長さ (cm)，v は流体の速度 (cm/s)，$\partial P/\partial x$ は1cm当りの圧力損失である。$\partial P/\partial x$ は，

$$\frac{\partial P}{\partial x}=\lambda_\rho\frac{\rho v^2}{2D}\Big/10^6\qquad(\mathrm{atm/cm})\tag{8}$$

ここで，ρ は流体密度 (g/cm^3)，λ_ρ は摩擦損失係数である。λ_ρ は通常鋼管では 0.029 であり，本設計ではこの値を採用する。

4-5　外部侵入熱

常温と低温部間の熱絶縁には，本設計ではスーパ・インスレーション方式を採用するが，これの熱伝導率は 1.2×10^{-7} (W/cm・K) 程度である。スペーサ効果も考慮すると，3.0×10^{-6} (W/cm・K) になると考えられる[1)]。これまでの低温ケーブルの設計例，即ち外部侵入熱とパイプ損の和を導体損の 40～50%に抑えるためには，断熱層の厚さが約10cm必要となる。

5. 熱　設　計

5-1　熱方程式

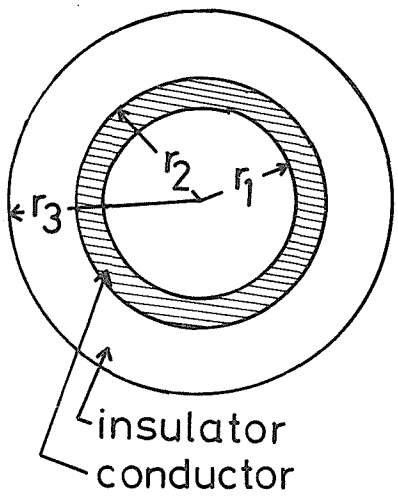
流体内に於いて，熱伝導によって蓄積される熱量 Δq_c，流動熱流によるもの Δq_f，発生熱 Δq_s が，定常状態では $\Delta q_c+\Delta q_f+\Delta q_s=0$ とバランスする。今，Δq_c，Δq_f，Δq_s は，

$$\Delta q_c=\lambda\frac{d^2T}{dx^2}\Delta V\tag{9}$$

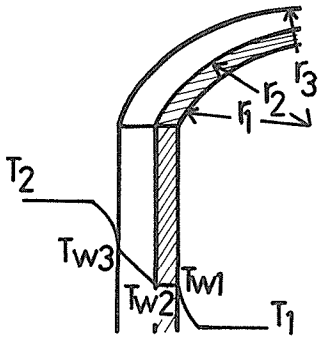
$$\Delta q_f=-C_p r u\frac{dT}{dx}\Delta V\tag{10}$$

$$\Delta q_s=q_1\Delta V\tag{11}$$

ここで，q_1 は導体内に発生する単位体積当りの熱量である。冷媒の λ は非常に小さいため，—



第5図 (a) 導体—絶縁系の断面図



第5図 (b) 導体—絶縁系の温度分布

般に，Δq_c は Δq_f や Δq_s に比べて無視される。従って，Δq_f と Δq_s を用いて，

$$\omega C_p \frac{dT}{dx} = Q \tag{12}$$

ここで，$\omega = rus$ (r; 冷却流体の比重，s; 流体通路の断面積，u; 流速)，$Q = q_1 s$, C_P は定圧比熱，T は温度，x はケーブル軸方向の位置を示す。

Q は各種送電損失によって与えられる。Q を算定するために，第5図に示される導体系の断面を考える。Q_1, Q_2, Q_3, をそれぞれ，導体の内壁 (r_1)，導体と絶縁物の境界 (r_2)，絶縁物の外壁 (r_3) を内側に向って通過するケーブル単位長当りの熱量 (W/cm) とすれば，

$$Q_1 = 2\pi r_1 \alpha_1 (T_{w1} - T_1) = \pi q_c \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln r_2/r_1} - r_1^2 \right) + \frac{2\pi \lambda_c (T_{w2} - T_{w1})}{\ln r_2/r_1} \tag{13}$$

$$Q_2 = \pi q_C \left(r_2^2 - \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \ln r_2/r_1} \right) + \frac{2\pi \lambda_c (T_{w1} - T_{w2})}{\ln r_2/r_1} = \pi q_D \left(\frac{r_3^2 - r_2^2}{2 \ln r_3/r_2} - r_2^2 \right) + \frac{2\pi \lambda_D (T_{w3} - T_{w2})}{\ln r_3/r_2} \tag{14}$$

$$Q_3 = \pi q_D \left(r_3^2 - \frac{r_3^2 - r_2^2}{2 \ln r_3/r_2} \right) + \frac{2\pi \lambda_D (T_{w2} - T_{w3})}{\ln r_3/r_2} = 2\pi r_3 \alpha_2 (T_2 - T_{w3}) \tag{15}$$

ここで，α_1, α_2 はそれぞれ内側及び外側を流れる冷媒の熱伝達率 (W/cm^3·K)，q_C, q_D は導体及び絶縁体の発生熱 (W/cm^3)，λ_C, λ_D は導体，絶縁体の熱伝導率 (W/cm・K) である。

外装パイプの内壁から外側冷媒に流れ込む熱 Q_5 (W/cm) も同様にして（第6図参照），

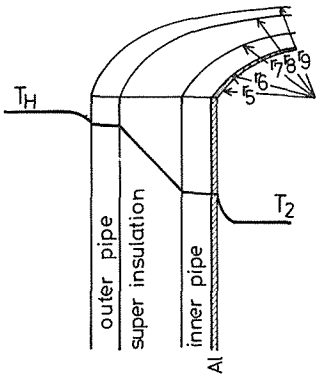
$$Q_5 = Q_5' + \frac{f}{p} \left\{ \frac{1}{k} + \frac{1}{j} + \frac{1}{h} + \frac{1}{g} + \frac{1}{e} \right\} Q_6' + \frac{f}{p} (T_H - T_2)^{14)} \tag{16}$$

ただし，$p = 1 + f\left(\frac{1}{k} + \frac{1}{j} + \frac{1}{h} + \frac{1}{g} + \frac{1}{e} \right)$

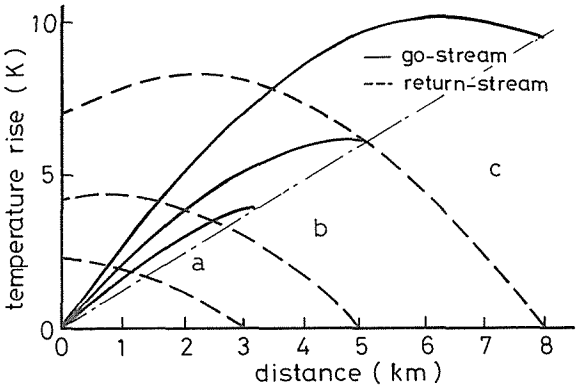
$e = 2\pi r_5 \alpha_2$, $f = 2\pi \lambda_i / \ln r_6/r_5$, $g = 2\pi \lambda_p / \ln r_7/r_6$,

$h = 2\pi \lambda_s / \ln r_8/r_7$, $j = 2\pi \lambda_0 / \ln r_9/r_8$, $k = 2\pi r_9 \alpha_{\mathrm{air}}$,

$Q_5' = \pi q_p \left\{ \frac{r_6^2 - r_5^2}{2 \ln r_6/r_5} - r_5^2 \right\}$, $Q_6' = \pi q_D \left\{ r_6^5 - \frac{r_6^2 - r_5^2}{2 \ln r_6/r_5} \right\}$.



第6図　断熱層（パイプ）の温度分布



第7図　冷凍ステーション間の温度上昇（ΔT）の分布
Q＝400 l/min, 冷凍ステーション間隔
a; 3km　b; 5km　c; 8km

第2表　本設計で用いたケーブルの寸法と各種送電損失

	液体窒素 (77 K)	液体水素 (20.4 K)	液体ヘリウム (4.2 K)
導体	アルミニウム　99.99		
導体抵抗率 (n・Ω・cm)	224	7.66	5.75
素線径 (mm)	2.0	0.2	0.2
導体断面積 (mm^2)	3000	2000	1500
導体内径 (mm)	80	60	60
導体外径 (mm)	105.7	82.4	77.4
絶縁体	冷媒含浸　Tyvek		
絶縁体外径 (mm)	165.7	142.4	137.4
設計ストレス (kV/mm)	12.15	12.89	13.14
内パイプ内径 (mm)	440	500	500
外パイプ外径 (mm)	542	722	722
断熱層	スーパーインシュレーション		
導体損 (W/m) (溶電流損 (W/m)	102.7 (22.1)	11.47 (7.33)	12.01 (7.86)
パイプ損 (W/m)	43.8	3.36	2.67
摩察損 (W/m)	1.14	0.39	0.69
誘電体損 (W/m)	0.218	0.18	0.17
外部侵入熱 (W/m)	0.207	1.54	3.00
ケーブル損失 (W/m)	148.1	16.96	18.54
冷却区間長 (km)	5	5	5
出口温度上昇 (K) go/return	12.12/9.31	3.62/2.59	5.22/2.39
冷却所要電力 (kW)	7803	4031	19189
送電損失 (W/m)	1560	806.2	3837

ここで，q_P は斜線部（パイプ損による発熱部）での発生熱 (W/cm^3), λ_i, λ_P, λ_s, λ_0 はそれぞれ斜線部，内側パイプ，断熱層，外側パイプの熱伝導率 (W/cm・k), α_{air} は空気の熱伝達率 (W/cm^2・K) である。

従って，ケーブル内の導体の内側を流れる冷媒の温度 T_1 と外側を流れる冷媒の温度 T_2 は，次の熱方程式によって与えられる。

$$\omega C_p \frac{dT_1}{dx} = Q_1 + Q_{F1} \tag{17}$$

$$-\omega C_p \frac{dT_1}{dx} = -Q_3 + Q_5 + Q_{F2} \tag{18}$$

ここで，Q_{F1}, Q_{F2} はそれぞれ内側冷媒及び外側冷媒に発生する摩擦熱 (W/cm) である。

5-2 ケーブル内の温度分布

本設計に用いたケーブル（第1図参照）の各寸法を第2表に示す。(17) 及び (18) 式を，この3相交流（50Hz）ケーブルに適用して，計算した液体水素の上昇温度 ΔT の分布を第7図に示す。本計算において，液体水素の比熱を始めとする熱力学定数は 20.4k の値を用い，液体の蒸発を無視した。実線及び波線はそれぞれ導体内部及び外部を流れる冷媒の温度上昇 ΔT を示し，a, b, c は，冷凍ステーションがそれぞれ3, 5, 8km毎に設置されたものとしての計算例である。この計算で1相当りの電流は8KA，冷媒の流量はポンプ効率も考慮の上 400l/min とした。ΔT は，本図に示されているように，冷凍ステーションからの距離 x に比例して増加するのではなく，上に凸の二次曲線的に増加し，冷凍ステーションの間隔巾が広がればその間で最大値をとることがあることに注意する必要がある。これは，往と復冷媒間の電気及び熱的絶縁体の間で熱の移動があるために生ずる現象であるため，もし，これに熱伝導率が零になる材料を用いれば，一点鎖線で示されるように ΔT は直線的に増加する。

6. 電気絶縁設計

同心円筒コンデンサでは，電界は絶縁体の内壁で最大となる。この値 E_{max} は，

$$E_{max} = \frac{V_p/\sqrt{3}}{r_1 \ln r_2/r_1} \times 10^{-1} \qquad \text{(kV/mm)}$$

ここで，V_p は線間電圧 (kV), r_2 と r_1 はそれぞれ絶縁体の外，及び内半径 (cm) である。通常 E_{max} は 10～15kV/mm と設計するので，V_p が 500kV のときの絶縁物の厚さは，30mm 程度必要になる。

液体水素中で使用可能な種々の絶縁物（第3表）の中から絶縁耐力，誘電体損，熱収縮，熱伝導率，強度等を考慮して選んだ結果，本設計ではアルミ化紙で遮蔽した液体水素含浸 Tyvek を採用することとした。

7. 安全性に対する検討

7-1 爆 発

水素は反応性に富む分子であるため，爆鳴気 (4.15～75Vol%) からの安全性に対しては，十分に注意する必要がある。実際には，大気中の 0～5ppm 程度の水素にも感度をもつ水素検知器[15]で，断熱層に於いて洩れを監視し，もし内側パイプから洩れた場合には，ポンプにより速やかに回収する方法をとることができよう。

第3表 極低温領域で使用可能な電気絶縁物

絶縁物	絶縁耐力 (kV/mm)	比誘電率 ε	$\tan\delta$ ($\times 10^{-5}$)		誘電体損 in LH_2 (W/m)	
			275 KV	500 KV	275 KV	500 KV
ポリエチレン	155 in LN_2	2.25	1.5		0.0796	0.263
ポリ塩化ビニル	109 in LN_2	2.6	12		0.736	2.43
セルローズトリアセテート	?	2.82	4.5		2.99	9.89
ナイロン	127 in LN_2	2.4	3		0.169	0.561
液体水素 (75 psig)	20	1.231	3.5	20	0.102	1.92
液体水素含浸 絶縁紙 (ブラックカーボンテープ有 75 psig)	53.2	3.4	69	64	5.53	16.96
液体水素含浸 絶縁紙 (ブラックカーボンテープ有 75 psig)	53.2	3.4	40	40	3.21	10.60
液体水素含浸 ノーメックス紙 (ブラックカーボンテープ有 75 psig)	53.2	2.4	79	85	4.47	15.91
液体水素含浸 Tyvek (ブラックカーボンテープ有 75 psig)	53.2	2.25	95	100	5.04	17.54
液体水素含浸 Tyvek (アルミ化紙しゃへい有 75 psig)	35.4	2.25	<1	<1	0.0531	0.175

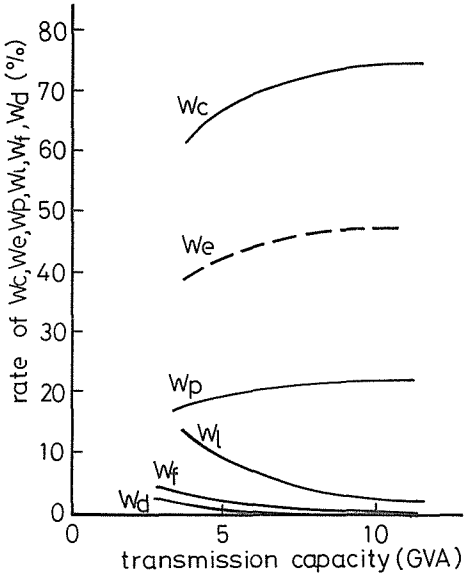
7-2 水素脆化

面心立方格子 (FCC) を成す導体材料，Al や Cu は，一般に体心立方格子 (BCC) より成る鋼に比べ，水素脆化に強い。低温構造材の SUS 304 (FCC) は，水素脆化に対して強いグループに属する。その中では，液体水素温度（この温度は水素脆化の生じやすい −100°C～+100°C範囲[15]の外にある）で水素の拡散侵入速度は 10 μm／年以下[16]と言われ極めて小さい。従って，パイプ材料に SUS 304 を用いれば，水素脆性による破壊や水素洩れに対する心配は事実上ないものに等しいと考えられる。

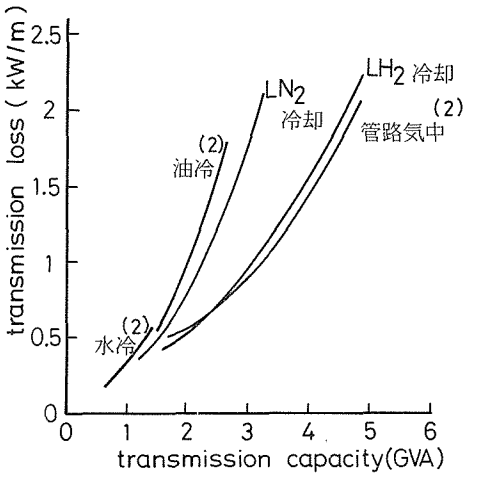
8. 総合評価

本設計では採用された液体水素冷却抵抗ケーブルと，比較のために取り上げた液体ヘリウム及び液体窒素冷却抵抗ケーブルの特性を第2表に示す。冷媒の流量は三者ともに 400 l/min である。

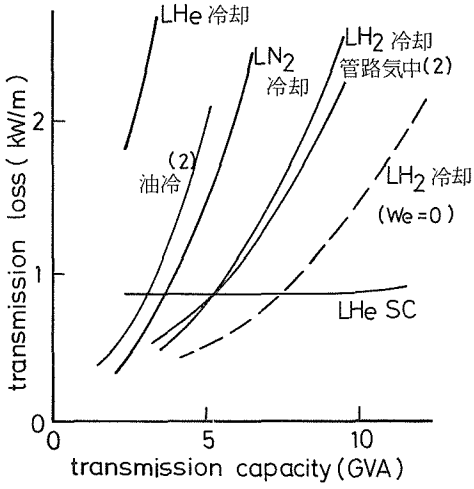
第8図は 500 KV 送電に対する各種損失 (W_c; 導体損，W_e; 導体損のうちの渦電流損，W_p; パイプ損，W_l; 外部侵入熱，W_f; 摩擦損，W_D; 誘電体損）の割合を送電容量の関数として示したものである。導体損 W_c が全損失の 70％程度を占めるが，それの 60％位が渦電流損 W_e に相当する。パイプ損 W_p も約20％にのぼり大きな割合を占める。送電容量の増加に伴い W_c と W_p の割合は増加するが，W_l, W_f や W_D の割合は減少し，この三者を合せても全損失の 10％以下へと



第8図　送電容量に対する各種送電損失の割合
W_c; 導体損，W_e; 渦電流損，W_p; パイプ損，
W_f; 摩擦損，W_l; 外部侵入熱による損失，
W_d; 誘電体損



第9図　各種ケーブルの送電損失の比較　275KV



第10図　各種ケーブルの送電損失の比較　500KV

減ずる。

第9図と第10図に，それぞれ V_p=275kV, 500kV とした場合の全送電損失(冷凍機運転電力を含む)と送電容量との関係を示す。V_p=275kV(第9図)の場合,液体水素冷却ケーブルの送電損失は管路気中送電のそれと同程度，また，現在実用されているOFケーブルや液体窒素冷却ケーブルの損失より小さいことがわかる。第10図（V_p=500kVの場合）には，更に液体ヘリウム冷却抵抗ケーブルと超電導ケーブルの損失も含めて示してある。液体ヘリウム冷却抵抗ケーブルでは，冷凍機運転上のペナルテイ η[2] が非常に大きくなり，その結果として損失も他の送電方式より圧倒的に大きい。従って，この方式は実用的でないと言えよう。液体水素冷却ケーブルの損失は他の送電方式と比較して第9図と同程度の位置にある。本計算には導体細線の直径を第2表に示したとおり 0.2mmφ としたが，最近の超電導材料用の細線製造技術は 7μmφ 程度のものも製造可能となっている[17]。これに伴い，Al 導体も一層の細線化が可能になり，導体の渦電流損を大巾に減ずることは難しいことではないと考えられる。点線で示される液体水素冷却ケーブルの損失曲線は，渦電流損 W_e を零とした場合の例である。導体の細線化技術の発達に伴い，損失曲線は限りなく点線の状態に近づくものと考えられる。その結果，送電容量 3～8GVA では損失が他の送電方式よりも小さくなる。

液体水量冷却送電方式は，以上に述べた通り，超電導送電で有利な大容量送電と，在来からあるOFケーブル等の中間に属する容量の送電に対しては最も損失の小さいことが明らかになった。

次に建設技術的課題から眺めてみる。液体水素は液体ヘリウムより熱容量が圧倒的に大きいた

め，ある程度の導体発熱の変動に対しても，冷却温度をほぼ一定におさえることが出来る。従って，冷却システムの建設に当っては，液体窒素冷却方式の延長技術が大巾に利用出来，液体ヘリ冷却方式に比べ，経済性，信頼性において圧倒的に有利であると考えられる。電気絶縁設計においても，液体ヘリウム含浸紙による絶縁では部分放電開始電圧が低く，設計ストレスが高くとれないという問題があるが[2]，絶縁耐力が液体窒素と同程度の液体水素では，この件については，何ら問題はないと思われる。

液体水素ケーブルと液体窒素冷却ケーブルに同じ大きさの電流を流した場合，導体の固有抵抗が圧倒的に小さくなる前者では，表皮効果や磁気抵抗効果による等価抵抗の増加を考慮しても，後者に比べて，発熱量が小さい。従って，温度上昇が送電密度の限界を決定する極低温ケーブルでは，前者が後者よりも送電エネルギー密度を高くすることが出来る。

9. 結　　論

液体ヘリウムと異なり，地球上に豊富に存在し将来とも供給に不安のないと考えられる液体水素を冷媒及び絶縁材として用いた極低温抵抗ケーブルの概念設計を行った。液体水素を冷媒ならびに電気絶縁物として電力ケーブルに使用した場合の得失を整理すると，次のようになる。まず特長としては，

1, 安価かつ資源的に豊富（一方，ヘリウムは高価，有限資源）
2, 冷却能力大（熱容量が液体ヘリウム，液体窒素のそれより圧倒的に大）
3, 断熱システム製作技術の容易性（液体ヘリウムを用いたシステムに比べて）
4, 電気的絶縁耐力及び誘電体損失小（液体ヘリウムに比べて）
5, 送電エネルギー密度を上げることが可能（液体窒素冷却ケーブルに比べて）

をあげることができる。欠点としては次の2点があげられる，

6, 冷却温度が高い $T_t=14$K, $T_B=20.4$K（液体ヘリウムの 4.2K に比べて）
7, 爆発，水素脆性（本文に示すように技術的に解決可能と考えられる）。

この液体水素を冷却材として用いた抵抗ケーブルの概念設計を行い，送電損失を他の送電方式のものと比較した。その結果超電導送電が経済的になる大容量送電と在来ケーブルとの中間の容量で，液体水素冷却ケーブルが経済的（送電損失が最小）であることが示された。また，実用システムの設計に当って重要になる冷凍ステーション間隔と，その間の冷媒の上昇温度分布が算出され，それは電気絶縁体の熱伝導率の値や冷凍ステーション間隔に依存することが明らかになった。

本研究は，文部省科学研究費の補助のもとに行なわれた。

参　考　文　献

1) 荒川，他：電力中央研究所第一研究報告 71021，7月（1971）
2) 古戸，他：古河電工技報　3月号（1981）p. 199
3) 田中聖三：低温工学，17（1982）p. 238
4) 低温工学協会：低温工学ハンドブック（1977）p. 43～49，内田老鶴圃新社
5) 田沼静一：実験物理学講座「低温」（1974）p. 287，共立出版
6) 日高一彦：電気四学会連合大会 S3-4（1970）
7) R. N. Allan et al : Proc. IEE, 115 (1968) p. 432
8) J. Bobo et al : Rev. Gen. Eléc 27 (1968) p. 605
9) K. N. Mathes : IEEE Trans EI-4 (1969) p. 2
10) M. J. Jefferies et al : Trans Paper IEEE Winter Power Meeting T_P 44-PWR (1969)
11) 高圧ガス保安協会編：低温技術の進歩（昭55）p. 60

12) 電気書院編：電力ケーブルハンドブック（1978）p. 397
13) Resistive Cryogenic Cable, Phase A ： EEI Project R_P 78−6 (1969)
14) 瀬古一行：液体水素冷却ケーブルによる高エネルギー密度低損失送電に関する研究　卒業論文（昭57）
15)「水素エネルギー」編集委員会：水素エネルギーシステムの開発，ISU 株式会社（1970）
16) 山川宏二：エネルギー特別研究 (1) 研究報告（名古屋）1月（1983）
17) 高圧ガス保安協会編：低温技術の進歩（昭55）p. 48