

大容量耐熱アルミニウム電線の 動向と将来

Heat Resistant Aluminum Alloys for Bulk Capacity Overhead Transmission Line Conductors: States of Arts and Trends

EC aluminum and heat resistant aluminum alloys have long been used for overhead transmission line conductors. Recently, however, to cope with the demands of the age of bulk capacity transmission, such as larger transmission current capacity and smaller transmission loss, a new type of heat resistant aluminum alloys has been developed. These new alloys excel in, among others, electrical conductivity or heat resistance. Their unique characteristics, applications and future prospects are discussed along with the problems concerning bulk capacity transmission lines.

大貫光明* *Mitsuaki Ônuki*
三宅保彦* *Yasuhiko Miyake*
田中 昭** *Akira Tanaka*

1 緒 言

わが国の最近の工業、経済の躍進が顕著なものであることは周知のとおりである。これに伴って電力供給体制の確立が現在急務となっており、各地で発電所建設計画が進んでいる。このようなすう勢と密接な関係をもって、送電容量の増加の必要性も一段と高まりつつあり、超高圧送電技術、大容量送電技術の発展が注目されている。送電線の導体としては従来からアルミニウムが使用されているが、使用条件の多様化によって特長のある種々のアルミニウム合金が開発され実用に供されている。とりわけ最近の送電線用アルミニウム導体の特性には、送電線の大容量化の傾向が反映され導電率および導熱性の向上が大きな課題となっている。日立電線株式会社ではこれらの要望を満たすため広範囲な基礎実験に基づく開発研究を行なった結果、60%以上の導電率をもつ高導電性耐熱アルミニウム合金および連続使用温度が従来の耐熱アルミニウム合金よりも50℃高い超耐熱アルミニウム合金を開発実用化した。

本報告ではこれらの新導電材料が要求されている背景について概要を説明したのち、耐熱アルミニウム合金を比較対象として、高導電性耐熱アルミニウム合金および超耐熱アルミニウム合金の特質および送電線の大容量化の現状と将来の動向について解説する。

2 送電線用アルミニウム導体の発展

2.1 耐熱アルミニウム合金

最近の電力需要予測では電力需要増加率は、平均11%にも達している。発電所の規模も電力需要の増加や効率的なエネルギー利用の見地からしだいに大きくなってきており、100万kVA以上の大形発電所が増加している。火力発電用蒸気タービンも経済性の点から大形化が進み、単機容量が100万kVA以上の超大形機も現われつつある⁽¹⁾。これとあいまって送電容量の増加も進み、従来の数百万キロワット送電はさらに大容量化され1,000万kW送電も間近になっているとみられる。このためOFケーブルも含めた500kV送電技術の開発、送電線の

多導体化や大サイズ化の動きも関連技術の進歩とともに活発になってきた。図1は需要の規模、送電容量の増加に伴う導体構成の変化について示したものである⁽²⁾。

一方、送電容量増加のためには、導電材料の面からは導体の耐熱性向上も有効な手段である。アルミニウムの耐熱性の向上についてはR.H.HarringtonがAl-Zr系合金の耐熱性に関し報告⁽³⁾して以来多くの研究が行なわれており、わが国ではアルミニウムに約0.1%のジルコニウムを添加した耐熱アルミニウム合金が実用化されている。この耐熱アルミニウム合金は導電率が58%で電気用アルミニウムより約3%低い⁽⁴⁾が、連続使用温度は電気用アルミニウムの90℃に対して150℃と非常に高い。その結果、耐熱アルミニウム合金では電気用アルミニウムに対して電流容量が約50%増加した。耐熱アルミニウム合金（以下TAIと略す）は当初送電容量の増加、用地取得難などの状況から既設需用家線の張替えに多く使用された。しかし、外径縮小に伴う風圧荷重の減少、鉄塔負担応力減少による経済性、2回線ルートでの事故時における健全回線の過負荷に対する能力などの点からも有用であり、新設線としての需要も多い。

図2は、最近における超高圧送電線の使用電線の推移を示したものである。鋼心アルミニウムより線（以下ACSRと略す）の使用量は、昭和43年と昭和49年とではあまり差がないが、鋼心耐熱アルミニウム合金より線（以下TACSRと略す）では約10倍に増加している⁽⁴⁾。

2.2 高導電性耐熱アルミニウム合金

TAIの導電率が電気用アルミニウムと比較して約3%低いという欠点は、送電線の大容量化や長距離化が進むにつれ、電力損失の増加として無視できないものになってくる。TAIの導電率を向上させることは、上述のように電力損失を減少させるという見地から当然のことであるが、これは同時に送電線の大容量化のための大サイズ導体運用面からもきわめて有益なことである。すなわち、接続工具の改良が進み電動式あるいはエンジン式の油圧圧縮工具によって、1,000mm²以上

*日立電線株式会社研究所

**日立電線株式会社日高工場

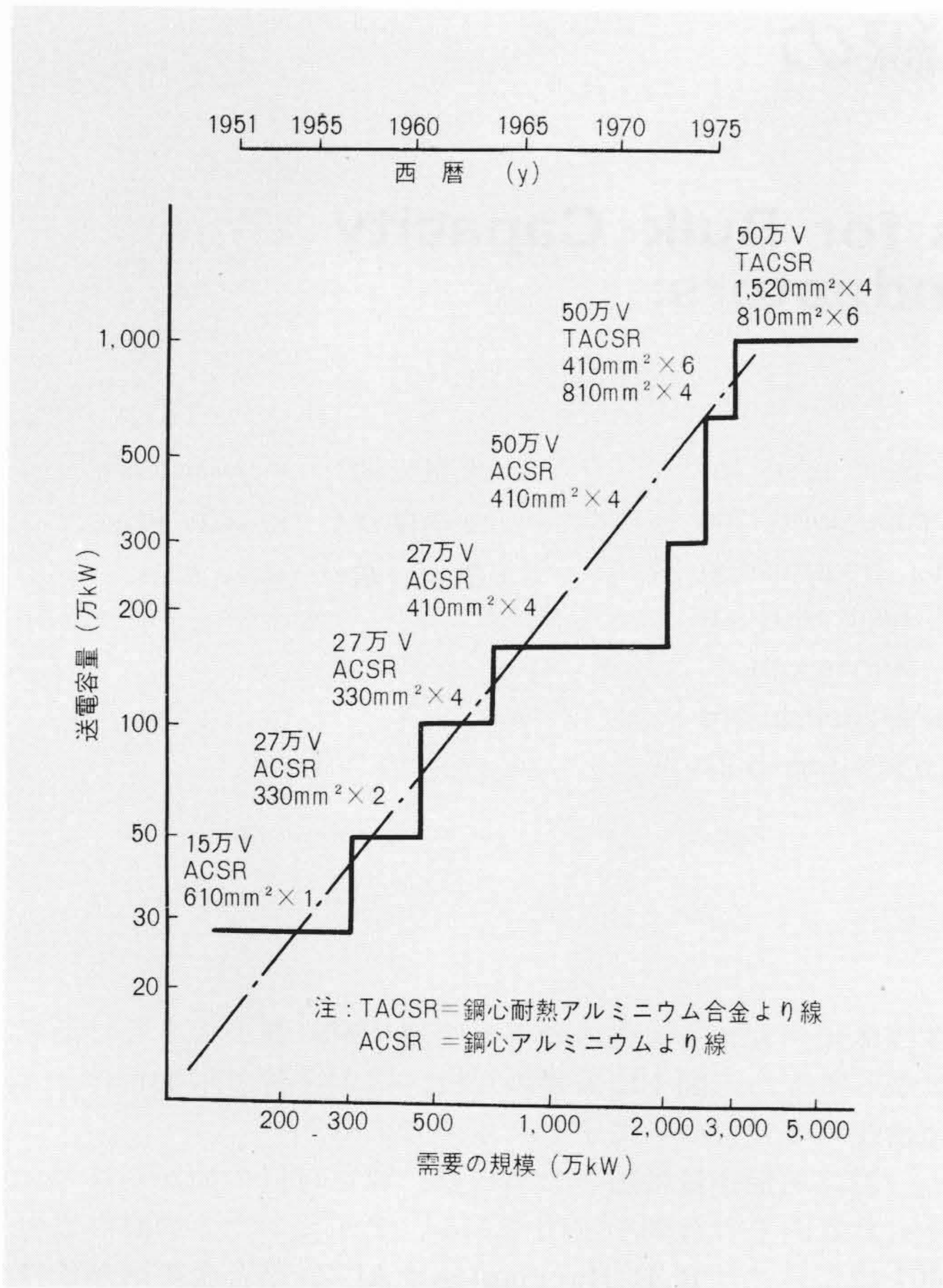


図1 需要の規模と主幹線送電容量および使用電線(東京電力株式会社) 送電容量の増加とともに送電線は大サイズ化し、導体も耐熱アルミニウム系統が使用される。

Fig. 1 Scale of Electric Power Demand vs Transmission Capacity, Conductor Kind and Size

の送電線の接続が可能になり、大サイズ導体の実用化が進展した。また導体サイズを大きくして4導体を2導体に、2導体を単導体にすることができれば架線工事が簡略化され、工事費の低減が可能になる。この際、工事費以外に送電損失、送電線の鉄塔たわみを考慮した鉄塔荷重の差による鉄塔費用などの総経費を計算すると、従来の導電率58%のTAIを使用した場合には、大サイズ化の効果はあまりなく、より導電率の高いTAIを使用して、はじめて大サイズ化の効果が現われてくる。従来の送電線の標準設計で154kV、50万kW送電に使用される610mm²2導体ACSRを導電率60%級TAIおよびACSRにすると1,160mm²単導体となり、ロス込み年経費が4%、建設費が8%低減できる計算である⁵⁾

日立電線株式会社ではAl-Zr系合金を含む数多くの合金系および合金の製造法などの基礎研究に基づいて、従来のTAIと同等の耐熱性をもつ導電率60%以上の高導電性耐熱アルミニウム合金(以下CTAIと略す)を開発し各需要家に納入している。

将来の電力需要の増加、クリーンエネルギーとしての水力発電の再認識から送電線の大容量化および長距離化は今後ますます進んで行くものとみられる。したがって、鋼心高導電性耐熱アルミ合金より線(以下CTACSRと略す)は、従来のTAIに代わって広く使用される傾向に向かうものと思われる。

2.3 超耐熱アルミニウム合金(UTAI)

最近ではTAIの用途の多様化が見られ、導電率より耐熱性

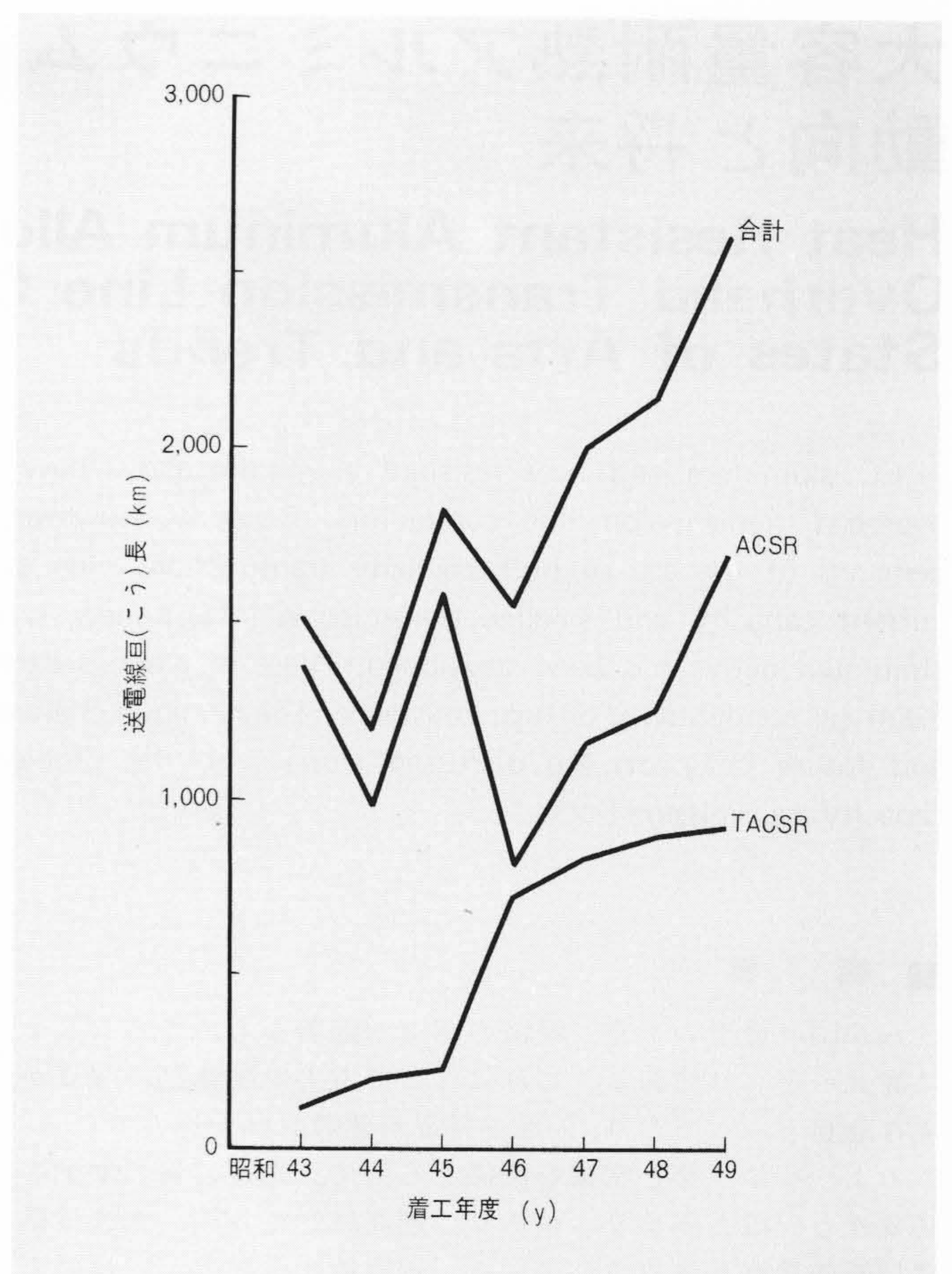


図2 わが国の超高压送電線(187~500kV)の使用電線 ACSRの使用比率は減少しつつあり、TACSRの使用比率は年々増加している。

Fig. 2 Conductors for EHV Transmission Lines in Japan

のほうが、重要になるような特殊用途も生じている。たとえば、負荷率の変動が激しく短時間のピーク時のみ高負荷がかけられる場合、張力はあまりかからず短距離で大電流を流す場合などである。このような特性をもつ導体の開発のため、日立電線株式会社ではCTAI開発と併行し、耐熱性向上に関する研究を行なった。その結果、数種類の超耐熱アルミニウム合金(以下UTAIと略す)を開発した。

これらはAl-Zr系合金を基礎にして、第3元素の微量添加および製造工程の改良によって開発されたものであり、導電率および耐熱性にそれぞれ特色をもつUTAIである。その代表的なものには導電率がほぼ従来品並みで連続使用許容温度が200℃で、電流容量が従来のTAIより約25%増加する画期的なUTAIがある。耐熱性以外の諸特性および付属品に対する熱影響などを総合的に検討した結果、このUTAIは十分な実用性能をもつことが判明し、実路線での試験を実施し、その効果を実証する段階に至った⁶⁾。この導体では、電流容量の増加とともにTAIを使用した複導体の構成をさらに簡略化することができ、サイズの縮小も場合によっては可能である。610mm²耐熱ACSR2導体の構成を1,160mm²鋼心超耐熱アルミより線(以下UTACSRと略す)単導体とするのがその一例である。この種の導体はエネルギー利用の効率化のために今後増加しつつある揚水発電所や、架設工事の困難な山岳部の送電ルート、ないしは負荷率の小さい送電線などにその特長を発揮することができる。

表1 各種TAI線の一般性能(4.2mmφ) 導電率以外の一般性能はいずれも同じである。

Table 1 General Properties of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires (4.2mmφ)

項 目	HAI	TAI	CTAI	UTAI
引 張 強 さ (kg/mm ²)	17.9	18.2	18.1	18.1
伸 び (%)	3.7	3.6	3.6	3.7
導 電 率 (%IACS)	62.3	59.0	60.4	58.1
ねじり回数 (回, 100d)	59	57	57	55
くり返し曲げ (回, 8mmR)	23	20	21	22
熱 膨 脹 係 数 (°C ⁻¹)	23.2×10 ⁻⁶	23.2×10 ⁻⁶	23.2×10 ⁻⁶	23.2×10 ⁻⁶
電気抵抗温度係数 (°C ⁻¹)	4.0×10 ⁻³	4.0×10 ⁻³	4.0×10 ⁻³	4.0×10 ⁻³
融 点 (°C)	660	660	660	660
比 熱 (cal/g.°C)	0.22	0.22	0.22	0.22
比 重	2.7	2.7	2.7	2.7

3 CTAI線およびUTAI線の諸特性

3.1 素線性能

3.1.1 一般性能

表1は電気用硬アルミニウム(以下HAIと略す)、TAI、CTAIおよびUTAI各単線の一般性能である。これらの合金線は導電率がそれぞれ異なり、CTAIはTAIより高く導電率60%以上で、UTAIはTAIよりやや低くなっている。その他の性能にはほとんど差がない。

3.1.2 耐 熱 性

図3は、HAI、TAI、CTAIおよびUTAIの等時軟化曲線である。CTAIはTAIと同等の耐熱性を示しており、UTAIはTAIよりもさらに高い耐熱性をもっている。

図4は180°Cおよび230°Cでの等温軟化曲線を示すものである。より高温の230°CではUTAIの耐熱性の優位性が明らかになり、230°C×1,000時間加熱後の引張強さの低下は7%に過ぎない。

表2は各種TAI線の短時間加熱試験後の引張強さ残存率を取りまとめたものである。

図5は150°Cでのクリープ試験結果である。HAIと比較してTAI系のクリープ量はかなり小さいが、なかでもUTAIのクリープ量は小さい。

3.1.3 耐 食 性

図6は、HAI、TAI、CTAIおよびUTAIの塩水噴霧試験結果および亜硫酸ガス試験結果である。各試料とも同等の耐食性をもっている。

3.2 より線の性能

3.2.1 より線の構造と性能

3.1で述べたように、各種TAI線の常温での機械的性能は電気用硬アルミニウム線と同等であり、導電率だけが多少の差がある。したがって各種TAI線を使用したACSRの標準品の構造および性能を取りまとめると表3のようになる。

3.2.2 より線の耐熱性

410mm²CTACSRを180°Cで1,000時間通電加熱後の電気抵抗および引張荷重の変化は表4に示すとおりである。両性能とも加熱による劣化はほとんど見られない。なお、TACSRの耐熱性もこれと同等以上である⁷⁾

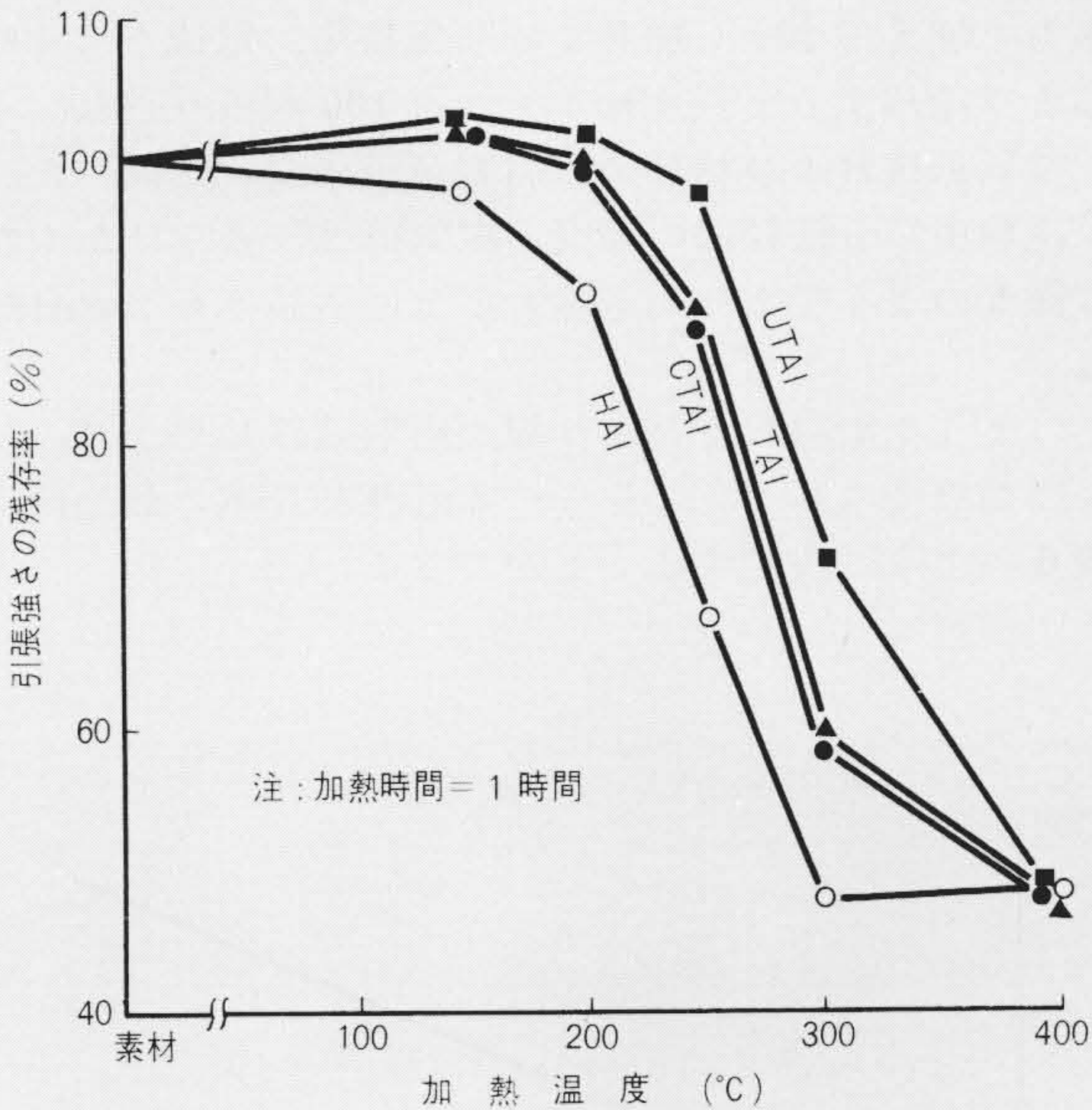


図3 各種TAI線の等時軟化曲線(4.2mmφ) CTAIはTAIと同等の耐熱性がありUTAIはさらに耐熱性が高い。

Fig. 3 Isochronal Softening Curves of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires

表2 各種TAI線の短時間加熱試験後の引張強さの残存率(4.2mmφ) CTAIとTAIは同等の耐熱性があり、UTAIの軟化は極少である。

Table 2 Residual Tensile Strength of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires after Short Time Heating Test

加熱条件	HAI (%)	TAI (%)	CTAI (%)	UTAI (%)
230°C×1時間	約70	93~98	92~96	98~100
260°C×4時間	約50	84~87	82~85	92~94

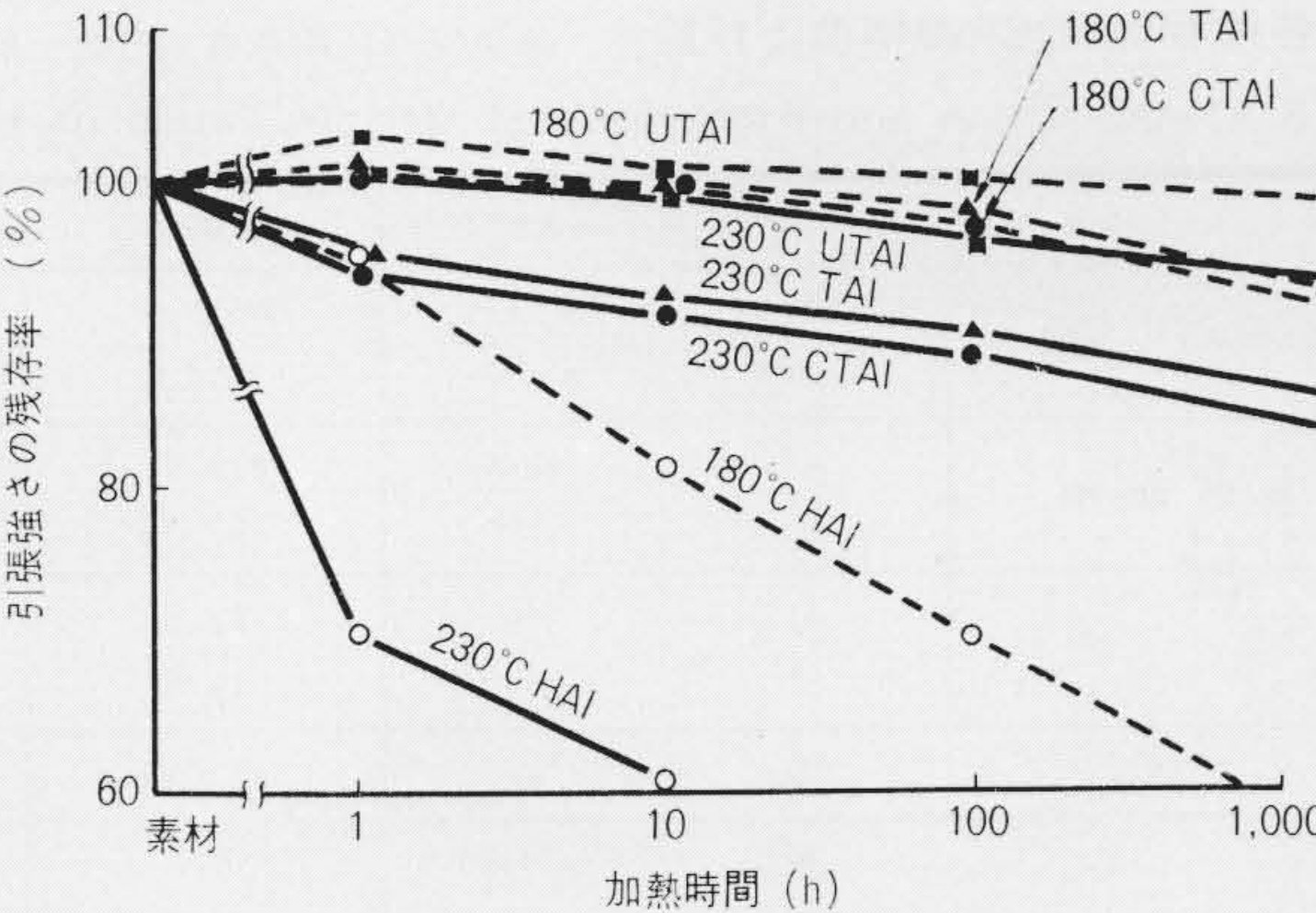


図4 各種TAI線の等温軟化曲線(4.2mmφ) 180°CでのCTAIおよびTAIは同等の耐熱性を示し、230°CでのUTAIの耐熱性は180°CでのTAIの耐熱性に等しい。

Fig. 4 Isothermal Softening Curves of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires

また1,160mm²UTACSRを直線スリーブ、引どめクランプなどの付属品とともに図7のような回路に接続し、6,000kgの一定張力を加えて230℃加熱1時間保持後、電流をしゃ断して室温まで冷却するというサイクルを100回くり返し、その温度、電気抵抗および加熱後の引張荷重の変化を調べた。その結果試験中にも接続部の温度、電気抵抗に異常はなく性能変化は図5のようであり、電線および付属品とも十分耐熱性がある。

以上のような素線およびより線の耐熱試験結果より、特殊電線専門委員会の基準⁽⁸⁾にそって各耐熱ACSRの最高使用温度を表6のように決定することができる。

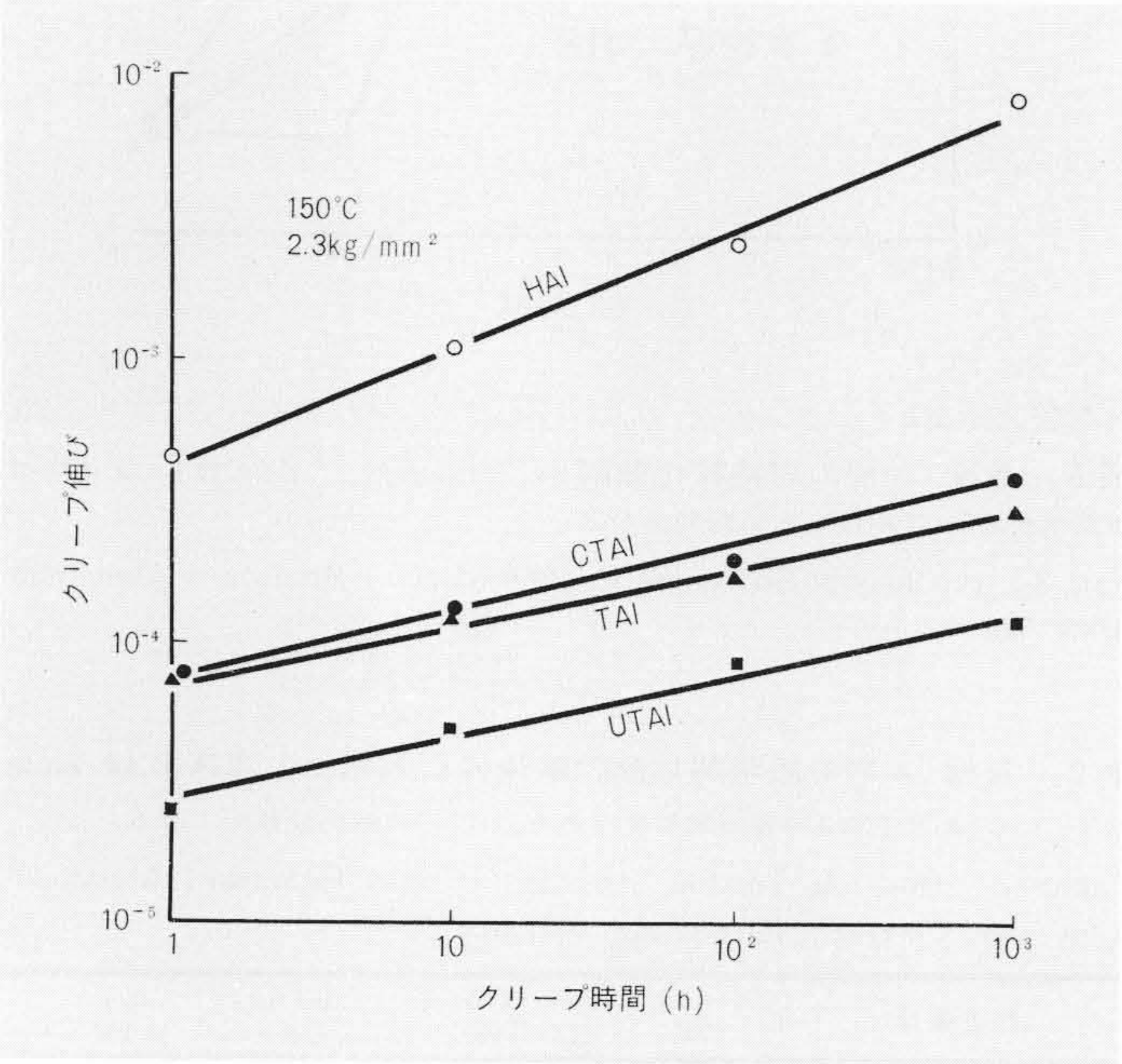


図5 各種TAI線のクリープ試験結果(4.2mmφ) CTAIおよびTAIのクリープ量は同程度であり、UTAIのクリープ速度は、CTAIおよびTAIの約1/2である。

Fig. 5 Results of Creep Test of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires

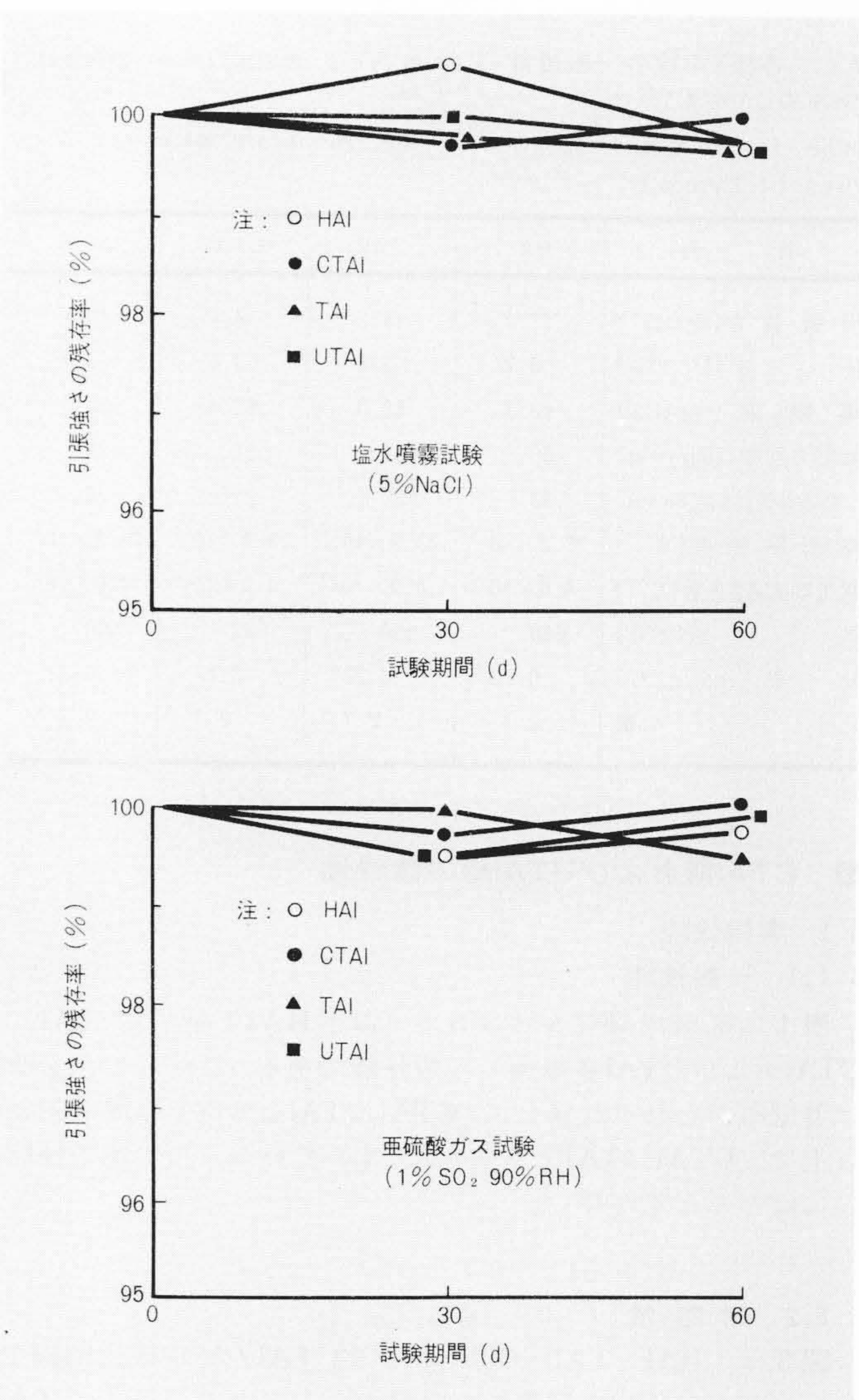


図6 各種TAI線の腐食試験結果(4.2mmφ) 各種TAI線はHAIと同等の良好な耐食性をもっている。

Fig. 6 Results of Corrosion Test of Heat Resistant Aluminum Alloy Wires

表3 各種耐熱ACSRの構造と性能 電気抵抗、耐熱性以外の一般性能は、いずれも同じである。

Table 3 Construction and Properties of Various Kinds of Heat Resistant ACSR

サ イ ズ		mm ²	410	610	810	950	1,160	1,520
構 成	Al	本/mm	26/4.5	54/3.8	45/4.8	84/3.8	84/4.2	84/4.8
	St	本/mm	7/3.5	7/3.8	7/3.2	7/3.8	7/4.2	7/4.8
計 算 断 面 積	Al	mm ²	413.4	612.4	814.5	952.6	1,163	1,520
	St	mm ²	67.35	79.38	56.29	79.38	96.95	126.7
外 径	Al	mm	28.5	34.2	38.4	41.8	46.2	52.8
	St	mm	10.5	11.4	9.6	11.4	12.6	14.4
引 張 荷 重		kg	13,890	18,150	18,480	23,100	27,830	36,390
重 量		kg/km	1,673	2,320	2,700	3,271	3,996	5,222
弾 性 係 数		kg/mm ²	8,360	7,990	7,250	7,430	7,430	7,430
線 膨 張 係 数		× 10 ⁻⁶ /°C	19.0	19.5	20.8	20.5	20.5	20.5
電 気 抵 抗 (DC : 20°C)	導電率(%)	Ω /km						
	57		0.0751	0.0507	0.0382	0.0327	0.0269	0.0205
	58		0.0738	0.0498	0.0375	0.0321	0.0264	0.0201
	59		0.0727	0.0492	0.0369	0.0315	0.0258	0.0198
	60		0.0715	0.0482	0.0363	0.0310	0.0254	0.0195
	61		0.0702	0.0474	0.0356	0.0305	0.0250	0.0191

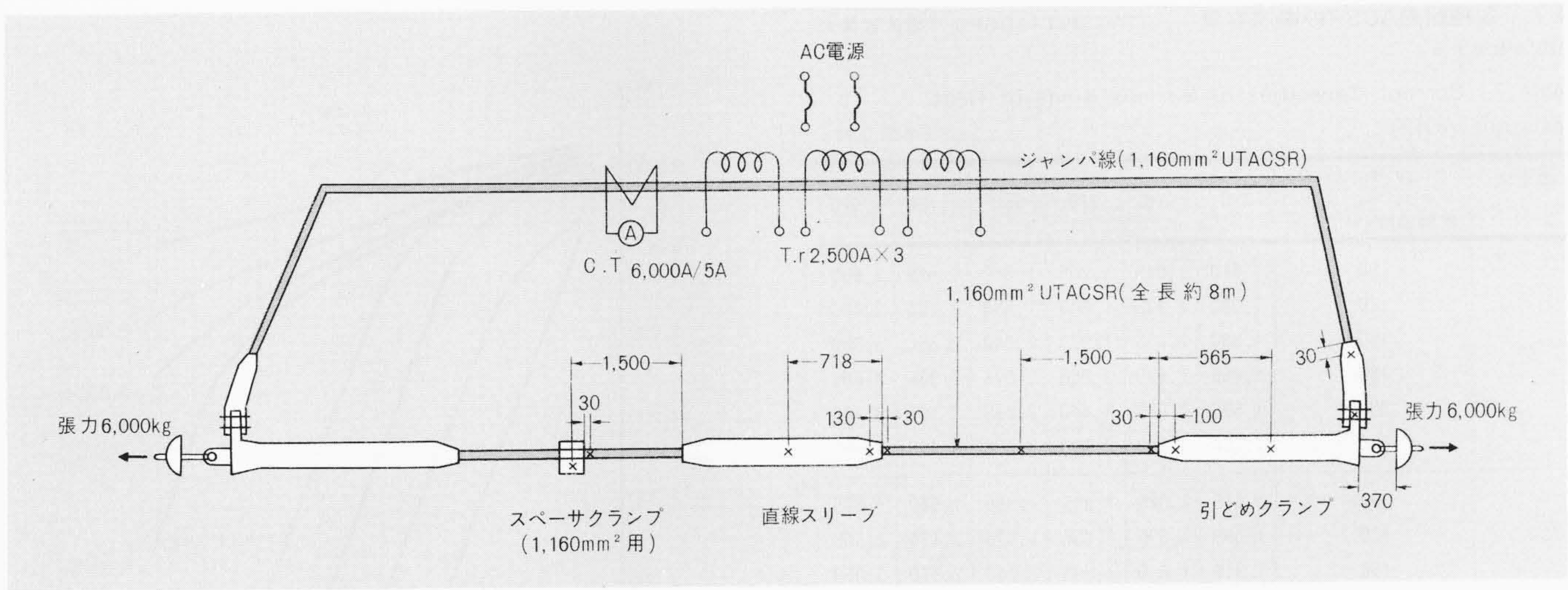


図7 1,160mm²UTACSR用付属品のヒートサイクル回路図 引どめクランプおよび直線スリーブをUTACSRに接続し、張力付加状態で試験した。

Fig. 7 Heat Cycle Test Circuit of 1,160mm² UTACSR Conductor and Accessories

表4 410mm²CTACSRの1,000時間加熱(180℃)後の性能変化 加熱前後の性能変化は極少である。

Table 4 Changes of Properties of 410mm² CTACSR after 1,000 hrs. Heating at 180℃

項 目	電気抵抗 (μΩ/m)	引張荷重 (kg)
規 格 値	71.4以下	13,890以上
加 熱 前	68.4	15,150
加 熱 後	68.2	14,750

3.2.3 より線の電流容量

ACSRおよび各種耐熱ACSRの90～230℃の範囲の各温度における電流容量を示したのが表7である。なお、計算条件は次のとおりである。

- 気温：40℃
- 風速：0.5m/s
- 日射：0.1w/cm²
- 放射率：0.9（黑色電線）
- 交直抵抗比：610mm²以上で1.0より大きい
- 導電率：61%（ACSR）60%（CTACSR）58%（TACSR, UTACSR）

この表をみると410mm²ACSR→610mm²TACSR、610mm²ACSR→810mm²CTACSR、610mm²TACSR→1,160mm²UTACSRとそれぞれ電流容量が約2倍となっていることがわかる。

3.2.4 弛(ち)度

耐熱ACSRは高い温度で使用されるため、高温時の弛度が問題となる。弛度を計算するためには電線の弾性係数を知る必要があるが、これは高温時にはアルミニウム素線部分の応力分担がゼロになるため見掛け上小さくなる。1,160mm²UTACSRについての測定結果は図8に示すとおりである。610mm²TACSRについてはすでに測定結果があるので、⁽⁸⁾ これらを使用し次の条件で弛度計算を行なうと図9のようになる。

- 導体数：2または4本/相
- 最大使用張力：610mm²、6,300kg/本
1,160mm²、8,000kg/本
- 径間長：350m

表5 1,160mm²UTACSRのヒートサイクル試験後の性能変化(230℃×1時間×100回) 付属品を含めて試験後の性能劣化は現われていない。

Table 5 Changes of Properties of 1,160mm² UTACSR after Heat Cycle Test (230℃×1h 100 times)

項 目	品 名	電 線	直線スリーブ	引 ど め ク ラ ム プ
	条件			
引張荷重 (kg)	規 格 値	27,830	26,440	26,440
	加 熱 前	28,500	27,800	28,700
	加 熱 後	29,900	29,250	28,650
電気抵抗 (μΩ/m)	加 熱 前	0.0263	26.2	19.0
	加 熱 後	0.0265	26.6	18.0

注：付属品の電気抵抗の測定は、両端の電線を含む1.7mについて行なった。

表6 各種耐熱ACSRの最高使用温度 CTACSRはTACSRと同じ許容温度であり、UTACSRはこれより50℃高い連続使用温度をもつ。

Table 6 Maximum Permissible Temperature of Various Kinds of Heat Resistant ACSR

電 線	ACSR	TACSR	CTACSR	UTACSR
運 続	90	150	150	200
短 時 間	120	180	180	230

注：実際の運用は各電力会社によって多少異なる。

同一温度では約2m、最高温度では約4mほど1,160mm²UTACSRのほうが弛度が大きい。一相あたり張力は610mm²TACSRに対して約2/3になるので、鉄塔設計上は経済的である。またもし一相あたり張力を同一にすればUTACSRの弛度の不利な点は解消される。

4 結 言

送電線の大容量化の傾向は、送電ルートの確保の困難化および発電所の単機容量の増大とともに今後も引き続き促進されるものと思われる。わが国の超高压送電線(187～500kV)に使用される耐熱ACSRの比率は年々増大しており、今後も

表7 各種耐熱ACSRの電流容量 UTACSRはTACSRより電流容量が約25%増加する。

Table 7 Current Capacities of Various Kinds of Heat Resistant ACSR (単位: A)

導電率 (%IACS)	サイズ(mm ²) 電線温度(°C)	410	610	810	950	1,160	1,520
57	90	810	1,015	1,205	1,350	1,525	1,800
	120	1,090	1,375	1,640	1,850	2,100	2,480
	150	1,300	1,655	1,975	2,240	2,550	3,030
	180	1,485	1,890	2,260	2,575	2,935	3,495
	200	1,595	2,035	2,440	2,775	3,165	3,785
	230	1,750	2,240	2,690	3,060	3,495	4,195
58	90	815	1,025	1,215	1,360	1,540	1,815
	120	1,095	1,390	1,655	1,870	2,120	2,505
	150	1,310	1,670	1,995	2,260	2,570	3,060
	180	1,500	1,905	2,285	2,600	2,960	3,530
	200	1,610	2,055	2,460	2,800	3,195	3,820
	230	1,770	2,260	2,710	3,090	3,530	4,235
59	90	820	1,030	1,225	1,375	1,560	1,830
	120	1,105	1,395	1,670	1,885	2,140	2,525
	150	1,320	1,680	2,010	2,280	2,600	3,085
	180	1,510	1,920	2,300	2,620	2,995	3,555
	200	1,620	2,065	2,480	2,830	3,230	3,850
	230	1,780	2,275	2,735	3,120	3,570	4,270
60	90	830	1,040	1,235	1,385	1,570	1,845
	120	1,115	1,410	1,685	1,900	2,160	2,545
	150	1,335	1,695	2,025	2,300	2,620	3,105
	180	1,520	1,940	2,320	2,645	3,020	3,585
	200	1,635	2,085	2,500	2,850	3,260	3,880
	230	1,795	2,300	2,755	3,145	3,600	4,300
61	90	835	1,050	1,245	1,395	1,580	1,860
	120	1,120	1,420	1,695	1,920	2,170	2,560
	150	1,340	1,700	2,040	2,320	2,630	3,125
	180	1,530	1,945	2,330	2,665	3,030	3,600
	200	1,640	2,095	2,510	2,875	3,265	3,900
	230	1,800	2,305	2,770	3,170	3,605	4,320

注: 1. 20°Cにおける導電率
2. %IACS=International Annealed Copper Standard

大容量送電線の標準線種として架空送電線としてはむしろ電気用アルミニウムに代わって定着するものと思われる。このような情勢に対応して日立電線株式会社は、これまで述べたような各種TAIの開発および送電線としての実用化を推進してきたが、これからもさらに顧客の要望に応じて研究開発に努めて行きたい。

最後に各種TAI線の開発に際しご指導をいただいた東京電力株式会社をはじめ各電力会社のかたがたならびに日立電線株式会社研究所山路副所長、電力ケーブル部比企野部長以下関係者各位に対し深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 加藤:「大容量蒸気タービンの動向と計画上の諸問題」日立評論 54, 805 (昭47-9)
- (2) 高木: 大容量送電技術の動向 昭和46年電気四学会連合大会論文集 1-15 (1971)
- (3) R. H. Harrington, "The effect of single addition metals on the recrystallization, electrical conductivity and rupture strength

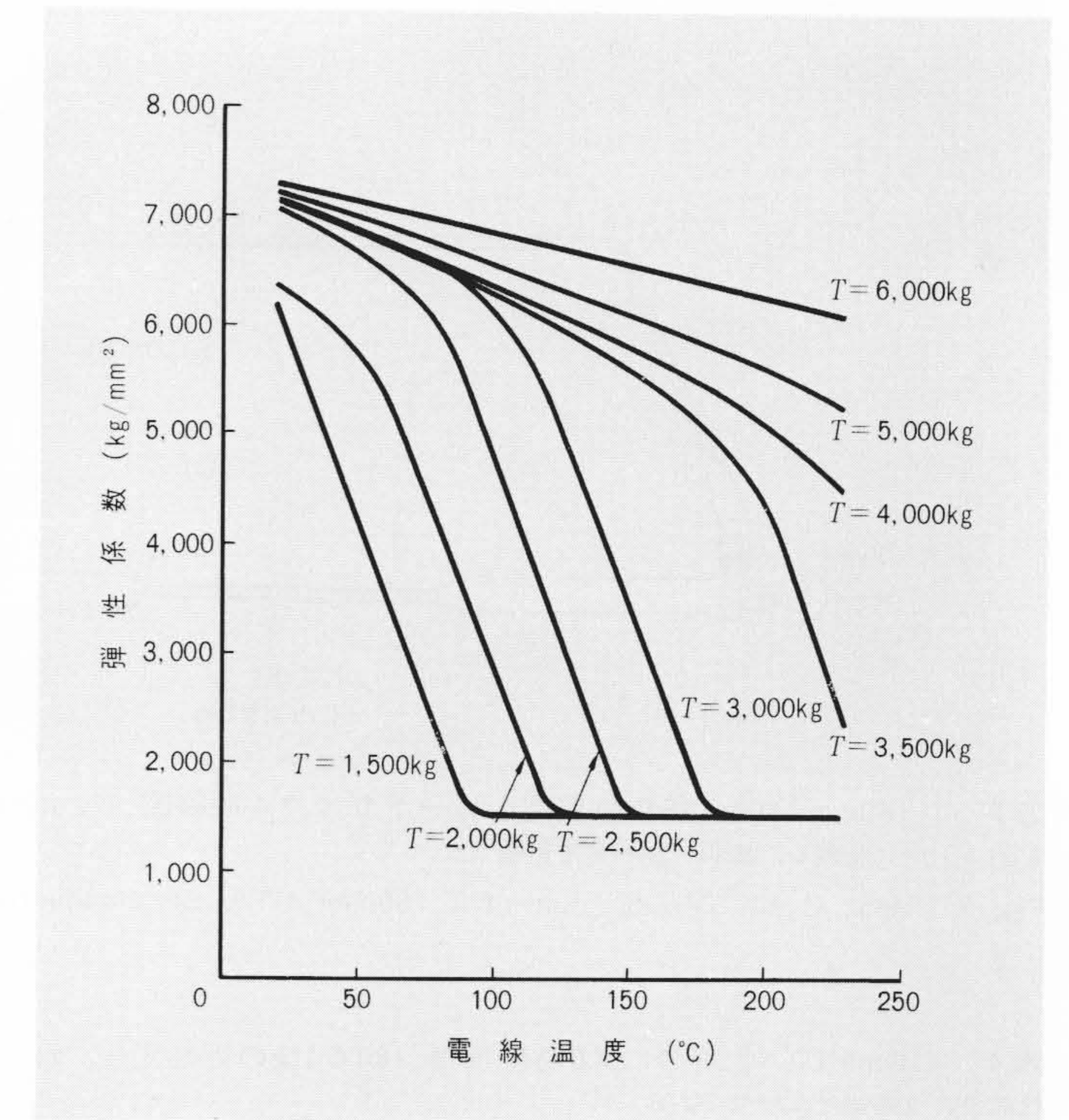


図8 1,160mm²UTACSRの弾性係数の温度特性 高温ではアルミニウム素線の応力分担はゼロになるので、見掛け上の弾性係数は小さくなる。

Fig. 8 Modulus of Elasticity vs Temperature Curves of 1,160 mm² UTACSR

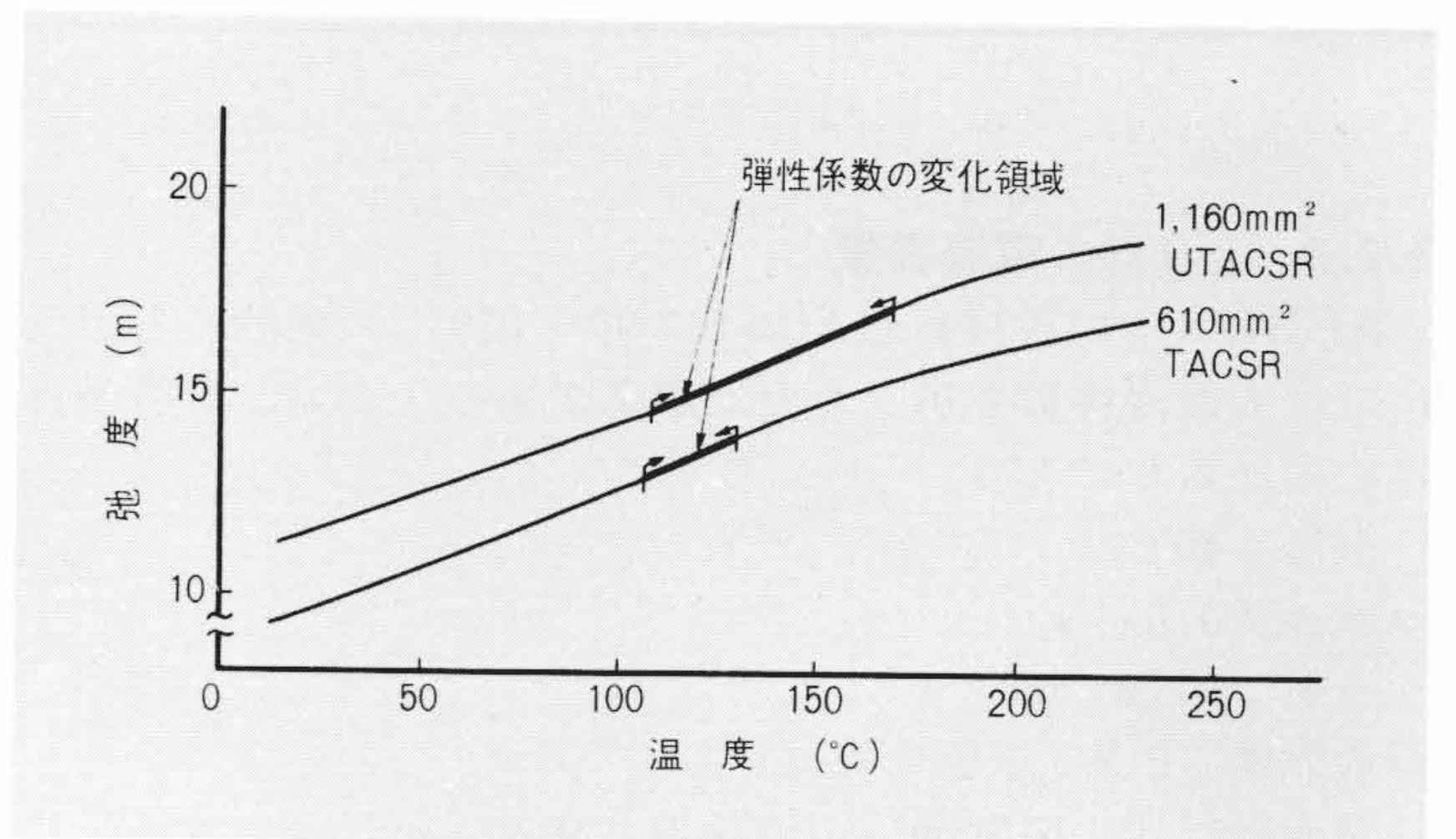


図9 1,160mm²UTACSRと610mm²TACSRの弛度の比較 UTACSRの弛度は約2m大きい、一相あたりの張力はTACSRの $\frac{1}{2}$ であり鉄塔設計上経済的である。

Fig. 9 Sag of 1,160mm² UTACSR and 610mm² TACSR

of pure aluminum", TRANS, ASM 41, 443 (1949)

- (4) 産業設備調査会: 電力設備長期計画 (昭46~55年度) (1972)
- (5) 村野ほか: 大導体電線とその付属品および工具について 電気評論 5, 618 (1971)
- (6) 三宅ほか: 導電用超耐熱アルミ合金の開発, 昭和四十八年電気学会全国大会予稿, 1037 (1973)
- (7) 山路ほか: 「耐熱アルミ合金およびアルミ被鋼心耐熱アルミ合金より線の高熱特性」日立評論 45, 1676 (昭38-9)
- (8) 送電機能研究委員会, 送電機能向上に関する研究報告 その1, 架空送電線, 電力中研 (1965)