UHV 送電線の対コロナ雑音設計

正 員 安 井 充 (東京電力)

1. はし が き

UHV 送電線の対コロナ雑音設計とは、晴曇天時において導体およびがいし装置から発生する可視コロナを抑制し、降雨時などの悪天候時に水滴から発生するコロナ放電により、ラジオ・テレビ受信障害や騒音問題を発生しないよう適切な対策を行うことである。

テレビが普及している今日、ラジオ受信障害への関心は薄れているが、北米において 765 kV 送電線などによるラジオ・テレビ受信障害やコロナ騒音問題の発生が報告⁽¹⁾⁽²⁾されている。

このような状況から判断して、送電容量面から比較的小形の導体が用いられる UHV 送電線に対しては、ラジオ・テレビ障害やコロナ騒音問題の抑制対策が重要な検討課題と考えられる。

また、導体方式は建設費に及ぼす影響が大きいので、UHV 送電線のラジオ雑音、コロナ騒音の予測手法を確立し、設計の信頼度を向上することが必要になる。

この点に関しては、最近 UHV 交流送電実証試験委員会(電中研)によって我が国独自の予測手法⁽³⁾が開発され、UHV 赤城試験線などによる実証試験により対策効果の確認が行われている。

従って本論文においては、この成果を十分活用してコロナ雑音設計手法のとりまとめを行い、環境対策面ならびに経済性の高い 1,000 kV 送電線の設計に資することとした。

2. 導体のラジオ雑音対策

〈2・1〉 予測手法 我が国で適用されているラジオ雑音の予測式(電中研)は、試験線などのラジオ雑音特性から導体表面の最大電位の傾き、導体方式の違いなどを補正係数として換算し、降雨強度に対応し

図 1 スパイラル線の取付法
(対角密着 4 条巻き)

Fig. 1. Attachment of spiral wire.
(4 wires diagonally coiled).

て、最外側導体直下の最低地上高点における地表上 1 m のラジオ雑音を計算する方法である。500 kV 送電線を対象にして開発されたこの予測式⁽⁴⁾は、実証試験の結果 1,000 kV より 1,200 kV の間で、8 ないし 10 導体に対し適用可能なことが確認された。

また、図 1 に示す風騒音対策用スパイラル線をつけた場合は、晴曇天時および軽雨時に 8 dB 程度雑音レベルが増加⁽⁵⁾することがわかった。

予測式が示す雑音レベルは、昭和 30 年に制定された電波技術審議会規格の測定器により測定されたものであり、昭和 48 年に国際無線特別委員会(CISPR)が定めた新規格に適合するよう改められた⁽⁶⁾。その結果、新規格の採用に伴い、従来の測定値を -4 dB 補正する必要があることがわかったので、従来の予測式を補正して適用すればよい。

ラジオ雑音レベルは降水強度により十数 dB 変化するるので、統計値を把握する必要がある。810 mm² 8 導体を 1,100 kV に課電したとき、降雨時における雑音レベルの累積度数分布は図 2⁽⁵⁾のようになり、ほぼ正規分布を示す。一方、降雨強度分布の 5% 値($R_5=5.5$ mm/h)、50% 値($R_{50}=0.42$ mm/h)に対応する雑音レベルを図 3⁽⁵⁾に示す降雨強度特性により求め、両者を比較すると表 1⁽⁵⁾に示すように比較的良く一致しているので、降雨強度分布が求まれば雑音レベルの累積度数に対応した値を求めることができる。

また図 3 に示すように、降雨強度に約 2 倍の開きが生じても、810 mm² 8 導体(スパイラル線あり)の場合雑音レベルの差は 2 dB 程度であるから、実用上は地域差の影響を考慮する必要はないものと考えられ

Countermeasures to Corona Noise of UHV Transmission Lines.
By Mitsuru Yasui, Member (Engineering Development Center,
Engineering R & D Administration, The Tokyo Electric Power
Co., Inc.).

安井 充: 正員, 東京電力(株)技術開発本部開発研究所

図 2 1,100 kV 課電時の降雨時ラジオ雑音レベルの累積度数分布

Fig. 2. Cumulative frequency distribution of radio noise level at 1,100 kV energizing in the rain.

図 3 ラジオ雑音レベルの降雨強度特性測定結果 (8×810 mm²).

Fig. 3. Measurement of radio noise characteristics with rain rate (8×810 mm²).

表 1 ラジオ雑音レベルの統計値
(8×810 mm² 1,100 kV)

Table 1. Statistical value of radio noise level
(8×810 mm² 1,100 kV).

単位: dB

天 候	スパイラル線	降 雨 時		晴 曇 天 時	
		なし	あり	なし	あり
5 % 値	測定値 (1)	55	58	—	—
		53	57	—	—
	予測値 (2)	57	57	—	—
50 % 値	測定値 (1)	48	56	35	41
		47	56		
	予測値 (2)	48	56	34	42

(1) 上段は降雨時累積度数分布より求めた測定値で、下段は降雨強度分布 5% 値, 50% 値に相当する 5.5 mm/h, 0.42 mm/h のときの測定値。

測定値は, UHV 赤城試験線 2, 3 号径間の中央より北側へ 60m 離れた地上 1m のアンテナで測定したものを下線直下の地上 1m に換算した値。

(2) 降雨強度 5.5 mm/h, 0.42 mm/h のときの予測値。

る。

また降雪時のラジオ雑音レベルについては, 降雪時のラジオ雑音レベルの累積度数分布より 5% 値, 50% 値を求め, 降雨時の雑音レベルの 5% 値, 50% 値と対比するとほぼ等しくなるので⁽⁵⁾, 降雨時の雑音レベルと同等に扱えるものと考えられる。

〈2・2〉 目標値と対策方法 対策を検討するとき用いる信号対雑音比 (SN 比) の N に対しては, CISPR は, 全天候の雑音レベルの 80% 値 (実質的には晴曇天時の雑音レベルに相当) を推奨しているが, 我が国は降雨時の雑音レベルを用いることにしている。

降雨時における雑音レベルの統計値は特に指定されていないが, 北米の電力会社は受信障害対策の経験に基づき降雨時雑音レベルの 50% 値を用いているので, ラジオ雑音対策を検討する場合は適切な値と考えられる。

1,000 kV 送電線の導体方式は, 放送電界強度の弱い

表 2 ラジオ雑音の予測値

Table 2. Estimation of radio noise level.

最高電圧 (kV)	導体方式 °(mm²) × 導体数	電線最低 地上 高 (m)	電線表面電位の傾き (kV/cm)		ラジオ雑音レベル (dB)				UHV 送電線 の建設費比 (%)
			G_{max}	G_p	降 雨 時			晴曇天時 L_{50}	
					最大値	L_5	L_{50}		
550	ACSR 410°×4	16	15.5	14.8	61	59	51	37	—
"	ACSR 410°S×4	16	15.5	14.8	61	59	59	45	—
1,100	TACR 410°×8	33	17.2	16.9	63	62	56	40	93
"	ACSR 610°×8	33	14.9	14.6	60	58	51	34	100
"	ACSR 610°S×9	33	13.9	13.6	57	55	54	39	104
"	ACSR 810°S×8	33	13.5	13.3	57	55	55	39	107

(注): ラジオ雑音の L_5 , L_{50} は, それぞれ赤城試験線における降雨強度度数分布の 5% 値 5.5 mm/h, 50% 値 0.42 mm/h を用いて計算した値, S は風騒音対策スパイラル線ありを示す。

山岳地において多くの実績を有する 500 kV 410 mm² 4 導体送電線の降雨時雑音レベル (50% 値) を目標値にすると、表 2 に示す 1,100 kV 導体方式の検討例より、610 mm² 8 導体が推奨される。なお、建設に際してはルート上の S を測定し、SN 比が 20 dB 未満の場合は導体の地上高増加に伴う障害範囲の拡大を考慮に入れ、導体方式の変更あるいは受信機側の対策について検討を行う必要がある。

3. コロナ騒音対策

〈3・1〉 予測手法 UHV 送電線に対しては、電中研の予測式が UHV 交流送電実証試験委員会により推奨されている。この方法はコロナケージ実験データをデータファイルに蓄積し、必要の都度データを取り出し、最外側導体直下の最低地上高点における地表上 1.5 m のコロナ騒音を計算するものであり、予測精度の向上を図るため数式化されていない。

データファイルより騒音レベルに寄与するパラメータの感度を調べると、最大導体表面電位の傾き、素導体径、素導体数の順位になるので、効率的にコロナ騒音を下げるには、細い電線により多導体を構成することが良いと考えられる。

UHV 導体の騒音レベルは次式に示すように、コロナケージ内に置かれた長さ l (m) の電線から、 r_0 (m) 離れたマイクロホンにより測定されたコロナ騒音出力音圧レベル P (dBA) に基づき計算された無限長導体より、1 m 離れた点の騒音レベルを基準にして予測地点までの距離 r (m) の減衰を考慮して予測される。

$$P_i = P + 10 \log r_0 + 10 \log \{ \pi / 2 \tan^{-1} (l / 2r_0) \} - 10 \log r$$

P_i は 1 相あたりの騒音レベルであるから、 N 相に対しては次式に示すように、各相の値を合成して P_T を求める。これは互いに無関係な音源の寄与を合成するとき、通常用いる方法である。

$$P_T = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^N 10^{P_i/10} \right\} \quad (\text{dBA})$$

コロナケージ試験においては、強雨時レベルは注水量 30 mm/h の騒音レベル、軽雨時レベルは注水停止後より 3 分まで電線の水滴が減少していく過程の騒音レベルを測定している。

一方、UHV 赤城試験線における騒音レベルの累積度数分布は図 4⁽⁷⁾ に示すとおりであり、これより騒音レベル測定値の 5% 値、50% 値を求め、コロナケージ試験による予測値の強雨時レベル、軽雨時レベルと対比すると表 3⁽⁵⁾⁽⁸⁾ のようになり、比較的良く一致している。UHV 送電線のコロナ騒音レベルは、線路の

図 4 降雨時コロナ騒音レベルの累積度数分布 (8×810 mm² スパイラルあり)

Fig. 4. Cumulative frequency distribution of audible corona noise level in the rain. (8×810 mm² with spiral wire).

表 3 コロナ騒音の測定結果と予測値

Table 3. Estimation and measured results of audible corona noise.

素 導 体 数			8 導 体	
スパイラル線の有無			なし	あり
電 圧 (kV)			1,100	1,100
コロナ騒音 (ランダム騒音) (dBA)	測定値	5 % 値	53	53
		50 % 値	47	50
	予測値	強雨時	54	54
		軽雨時	45	49
コロナハム音 (dBA)	測定値	5 % 値	39	45
		50 % 値	31	41
	予測値	強雨時	43	45
		軽雨時	34	38

(注) 素導体: ACSR 810mm²

パラメータを考慮して予測を行うので、コロナケージ試験のデータに基づく予測式により、その統計値を求めることにしているが、両者の間には何ら物理的現象としての必然性はなく、たまたま近似的に対応していることから予測手法として推奨されるものである⁽⁵⁾。

コロナ騒音は表 3 に示すように風騒音対策用スパイラル線により増加するが、騒音レベルの降雨強度特性は図 5⁽⁸⁾ に示すように緩慢であるから、降雨強度に 2 倍程度の相違があっても騒音レベル差はわずかであり、実用上地域差を考慮する必要はない。

〈3・2〉 目標値と対策方法 コロナ騒音の評価に関しては、北米の超高压送電線による苦情の発生に基づく IEEE の提案⁽⁹⁾があり、53 dBA (米国規格測定器と我が国との差を考慮すると 50 dBA になる。)以上では、多少の苦情が発生すると評価している。

図 5 コロナ騒音レベルと降雨強度との関係
Fig. 5. Relationship between rain rate and audible corona noise.

表 4 既設送電線のコロナ騒音

Table 4. Audible corona noise of existing power line.

国 名	電圧 (kV)	導体方式	測 定 例 (dBA)	
			コ ロ ナ 騒 音	コ ロ ナ ハ ム 音
日 本	550	4×410 mm ²	$L_s=50\sim56$, $L_{50}=44\sim47$	$L_s=30\sim32$, $L_{50}=19\sim20$
		4×240 mm ²	$L_s=53\sim58$, $L_{50}=48\sim53$	$L_s=24\sim27$, $L_{50}=12\sim22$
		4×240 mm ² S	—	$L_s=34$, $L_{50}=23$
アメリカ	500	1×6.4 cm	$L_s=64$, $L_{50}=61$	54
	705*	4×3.0 cm	$L_s=55$, $L_{50}=51$	$L_{50}=32$
	760*	—	$L_s=62$, $L_{50}=59$	37
	—	4×3.5 cm	$L_s=60$, $L_{50}=56$	29

- (注) 1. S印: スパイラル線あり。
2. 地上高は送電線によって異なり一定ではない。
3. *印: 測定時の電圧、ほかは公称または最高電圧。

図 6 コロナ騒音の周波数スペクトラム
($G_{max}=18$ kV/cm)

Fig. 6. Frequency spectrum of audible corona noise.

一方、我が国の 500 kV 送電線のコロナ発生レベルは、表 4⁽⁵⁾に示すように北米の苦情発生例より低く、また苦情も発生していない。従って、コロナ騒音の目標値として降雨時レベルの 50% 値の 50 dBA を採用すれば、国内外の運転実績からみて適切と考えられる。

なおコロナ騒音には、図 6⁽¹⁰⁾に示すように交流周波数の 2 倍の純音であるコロナハム音が含まれている。ハム音はコロナ騒音を目立たせるので、無響室内において聴覚実験を行い、音の大きさについて検討を行った。その結果、図 7⁽⁵⁾に示すように A 特性騒音レベルが同じであれば、ハム音はコロナ音全帯域などに比べて低く聞える結果が示された。

また、うるささに関する実験より、図 8⁽⁵⁾に示すようにハム音とコロナ音全域との間に差が認められな

図 7 大きさ比較の実験結果
(被験者 11 名の平均値)

Fig. 7. Experimental results on the comparison of loudness (Mean value of 11 listeners).

図 8 コロナ騒音レベル『うるささ』の関係

Fig. 8. Relationship between audible corona noise level and noisiness.

表 5 交流 1,000 kV 導体方式の検討例
Table 5. Examination of AC 1,000 kV conductor system.

適用箇所 導体方式 コロナ 騒音 予測値(dBA)	人家接近 箇所 ACSR 810 mm ² 8 導体	人家の接近 しない箇所 ACSR 610 mm ² 8 導体	定格電流導体 (8 kA) TACSR 410 mm ² 8 導体	(参考) 550 kV (4 kA) ACSR 410 mm ² 4 導体
コロナ騒音	49*	50 54*	53	51*
コロナハム音	38*	41 44*	49	39*

(注): *印はスパイラル線ありの場合

ったので、コロナ騒音を目標にして対策を行うこととし、ハム音に関する目標値は設定していない。

1,000 kV 送電線の導体方式に関して、50 dBA をコロナ騒音レベルの目標値として検討を行った結果を表 5 に示す。同表において、810 mm² 8 導体は風騒音対策上、スパイラル線を設置する場合はコロナ騒音レベルの目標値を満足するので、人家接近箇所に適合可能な導体方式である。

人家がほとんど接近しない山岳地においては、ラジオ雑音対策も考慮に入ると 610 mm² 8 導体を適用可能であり、送電線建設費は 810 mm² 8 導体に比べ 7 % 節減できる。

万一、将来において人家接近が生じて風騒音対策を行う場合を考えても、8 導体最下部の 2 導体の間に単導体を添架する添線方式により、コロナ騒音レベルを目標値以下に低減できるので、経過地の大部分が山岳地の 1,000 kV 送電線においては、適合性に優れた導体方式と考えられる。

4. がいし装置のラジオ雑音対策

1,000 kV がいし装置は、晴曇天時に最高電圧の 1.2 倍に相当する電圧で可視コロナを発生しないこと、また降雨時、降雪時など悪天候時のラジオ雑音を導体以下に抑制するように設計する必要がある。

実験室の課電試験によると、乾燥時に耐張装置のライン側ががいしをヨークに接続するソケット金具の可視コロナが消滅しないので、シールドリングを取り付ける必要がある⁽¹¹⁾。

また、注水時に対張装置のシールドリングや懸垂装置のアークホーンのラジオ雑音レベルが高くなるので対策の検討が必要になる。

〈4・1〉 予測方法と目標値 がいし装置の雑音レベル (RI) は、最高電圧の対地電圧を印加し、悪天候条件として 3 mm/min (180 mm/h) の高注水条件下で雑音電圧 (RIV) を測定し、次式⁽¹²⁾により換算している。

$$20 \log \left(\frac{h}{2} \ln \frac{h}{r} \right) \leq 20 \log \frac{RIV}{RI} \leq 20 \log \left(h \ln \frac{2h}{r} \right)$$

上式において、1,000 kV 送電線の最低地上高を 33 m (地上静電界強度 5 kV/m)、810 mm² 8 導体 (素導体間隔 40 cm) の等価半径を 0.45 m とし、実験室の測定回路の検出インピーダンス 150 Ω から、送電線のサージインピーダンス 237 Ω への補正として $20 \log (237/150) \approx 4$ dB を考慮すると、雑音端子電圧から雑音レベルへ換算するには 34~40 dB の範囲が示されるが、安全側に評価することとし 34 dB を用いる。

がいし装置のラジオ雑音は、1,000 kV 導体のうち最も雑音レベルの低い 810 mm² 8 導体スパイラル線ありを目標とする。一方、がいし装置の雑音電圧は高注水条件下で測定するので、導体のラジオ雑音レベルは表 2 より降雨時最大値の 57 dB を用いて雑音電圧に換算し、91 dB を目標値として設定する。

〈4・2〉 対策方法 懸垂装置においては、図 9 に示すアークホーンのライン側の Y 座標を減少させて (Y_P を 700 mm → 250 mm) 導体の遮へい効果を活用することにより、ラジオ雑音電圧を 90 dB に抑制可能である (図 10 参照)。

耐張装置においては、シールドリングのラジオ雑音が高いので、最初は水平リングをかご形に連結した大形リングを必要としたが、検討を進めてきた結果、ジャンパー線の遮へい効果を生かし、更に図 11 に示す小形リングを開発し、ラジオ雑音電圧を 90 dB に抑

図 9 54 トン懸垂がいし装置

Fig. 9. 54 ton suspension insulator assembly.

図 10 54トンがいし装置の RIV 特性
Fig. 10. RIV characteristics of 54 ton insulator assembly.

図 11 小形リングの効果的な取付け配置
Fig. 11. Effective arrangement of small rings.

制することができた (図 10 参照)。

同図において、 α は注水時にリングの座標 $X \cdot Y$ が雑音電圧に及ぼす影響を、また β は座標 $X \cdot Y$ および小形リング間の間隔 G が可視コロナに及ぼす影響を示しており、斜線の部分に座標を選定すれば、ラジオ雑音電圧および可視コロナの目標値を満足できる

(図 11 参照)。

小形リングの実用性能は UHV 赤城試験線において、ラジオ雑音レベルの変動の少ない降雨強度 3~5 mm/h のときに測定が行われ、スパイラル線を取付けた 810 mm² 8 導体の雑音レベルに影響を及ぼさないことが確認されている。

5. テレビ雑音

810 mm² 8 導体にスパイラル線を取付けた場合、降雨時のテレビ雑音を調べるため、UHV 赤城試験線において 2 チャンネル専用 5 素子八木アンテナと、JIS 規格のテレビ雑音測定器 (周波数は 99.5 MHz) により測定が行われた。

その結果、1,100 kV 課電時における雑音レベルの最大値は 15 dB⁽⁵⁾ であり、サービスエリアの最低電界 54 dB に対して SN 比が 39 dB 確保され、EPRI の示す SN 比 30 dB、すなわち受信画像品質の評価 3 (雑音が認められるが、じゃまにならないに対して) 十分余裕のあることがわかった。これより、1,000 kV 送電線はテレビ雑音障害を生じないものと推定される。

6. まとめ

UHV 送電線の障害対策の基本となるラジオ雑音およびコロナ騒音について予測手法を述べ、交流 1,000 kV 導体方式の選定方法を示した。

また、導体のラジオ雑音レベルを基準にしてがいし装置のコロナ遮への検討を行い、コロナ特性ならびに経済性に優れたシールドリングを開発し設計方法を明らかにした。その要旨は次のとおりである。

(1) 交流 1,000 kV 送電線の導体方式は、長年運転実績を有する 500 kV 410 mm² 4 導体のラジオ雑音レベルならびにコロナ騒音レベル 50 dBA を目標にして検討を行った結果、610 mm² 8 導体が選定される。

(2) 風騒音対策用スパイラル線を設置する場合の導体方式は、コロナ騒音レベル 50 dBA を目標値にして検討を行った結果、810 mm² 8 導体が選定される。

(3) がいし装置のラジオ雑音レベルは、シールドリングおよびアークホーンの形状、寸法を適切に選定することにより、導体のラジオ雑音レベル以下に抑制できる。

(4) 1,000 kV 送電線においては、ラジオ雑音対策を考慮して導体およびがいし装置の設計を行えば、テレビ雑音は問題にならない。

(昭和 61 年 3 月 25 日受付)

文 献

- (1) C. Clark et al.: "Some Observations of Foul Weather Television Interference", IEEE PES Power Meeting, paper No. TP 140-PWR (1970-2)
- (2) 福島:「コロナ騒音 (Audible Noise) の海外における研究状況と主な成果」, 電研技一研調査報告, No. 7451 (昭 49-12)
- (3) 笹野・沢田・福島・甘棠・鈴木:「UHV 交流送電線の騒音と雑音(DK)—UHV コロナケージによる1,000~1,200 kV 級送電線のコロナ特性の測定」, 電中研報告, No. 17806 (昭 54-7)
- (4) 沢田, 他:「交・直流架空送電線の電波障害および誘導障害」, 電中研総合報告, No. 23 (昭 48-8)
- (5) UHV 交流送電実証試験委員会報告書(環境対策): (昭 60-9) 電中研
- (6) 電波技術審議会:「妨害波測定器規格」, 昭和 48 年答申
- (7) 笹野, 他: UHV 赤城試験線による環境影響の実証試験(Ⅱ), 電中研報告, No. 1835 (昭 59-4)
- (8) 送電線のコロナ騒音 TOI 電中研総合報告書: (昭 61-9)
- (9) D.E. Perry: "An analysis of transmission audible noise level based upon field and three-phase test line measurements", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-91, 857 (1971)
- (10) UHV 交流送電線の障害対策に関する基礎研究, 電中研総合報告書, No. 110 (昭 57-5)
- (11) T. Fujimura, K. Naito, Y. Hasegawa, R. Matsuoka & Y. Nakajima: "Study on corona performance of insulator assembly for UHV Transmission line", *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, PAS-98, 860 (1979)
- (12) 500 kV 送電実証試験委員会報告書:「静電誘導とコロナ雑音」, No. 4 (昭 47)