

# DENKEN REVIEW

## 電研レビュー

UHV送電—将来の送電幹線への展望



1982.3 - 1982.10

電研レビュー 第5号 ● 目次  
UHV送電—将来の送電幹線への展望

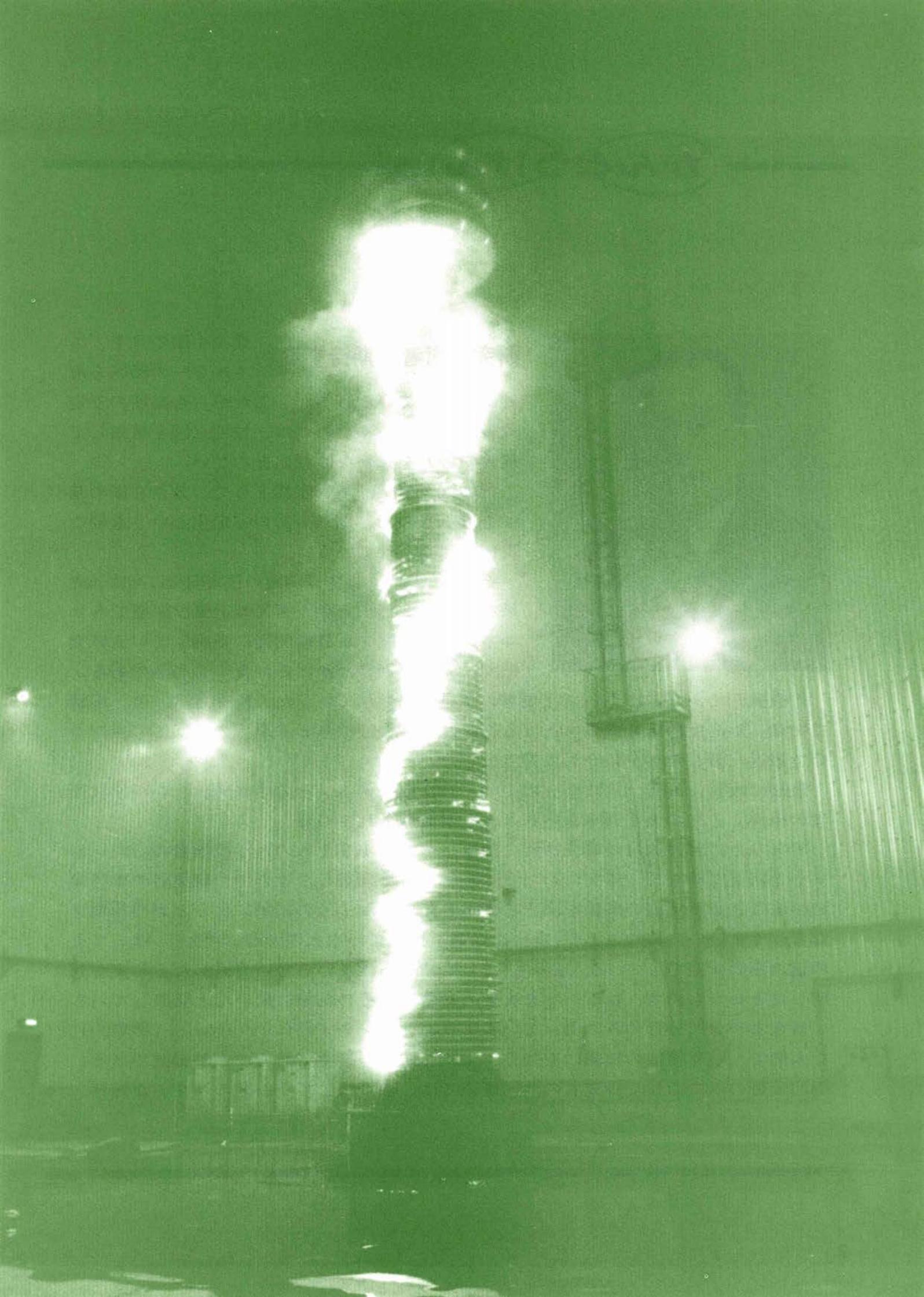
巻頭言	2
第1章 緒言	7
第2章 UHV交流送電	
2-1 ● 要旨	14
2-2 ● 絶縁の信頼性評価	16
2-3 ● 障害防止	22
2-4 ● 機械力(鉄塔の動的安定性)	26
2-5 ● 系統技術	32
2-6 ● 実証試験	40
第3章 UHV直流送電	
3-1 ● 要旨	52
3-2 ● 絶縁の信頼性評価	54
3-3 ● 障害防止	60
3-4 ● 運用制御	67
3-5 ● 試験送電線と関連設備	74

UHV級がい管の耐電圧試験 ▶

交流100万ボルト級のUHV送電用のがいし連やがい管の大きさは、主に、塩分を多量に含んだ季節風等により、表面が汚損された状態での耐電圧特性で決定される。

特にブッシング用がい管の大きさは、従来の500KVがい管からの比例換算によると長さが15m前後にも達し、耐震上も製造上も深刻な問題を提起し、UHV送電の成否を左右しかねない。

このため、当所では、武山試験研究センターに自然の湿潤状態を再現できるUHV霧中実験棟を設置し、各種の汚損耐電圧試験を行い、現在までに、汚損と耐電圧の関係を明らかにし、また、形状の改善により10-12m程度にがい管を小型化できることを実証するなどの成果を上げている。





## 研究技術者に期待する

資源小国の日本、エネルギーの85%を海外に依存している日本が、これからも高度の安定成長を続けていくためには、技術立国を目指して最善の努力を払わなければならない。

特に電気事業は基幹産業として、技術立国の基盤を造るもので、電気事業の安定化という重要な責任を課せられている。

その為にはエネルギー関連の技術開発に高度の成果をあげることが、必要不可欠の重要な課題であり、エネルギーに関する技術開発に参画している研究機関に大きな期待がかけられるのも当然である。

研究機関のあり方について、幾多の意見が出されているが、「研究意欲」と「広範な知識」は高度の研究成果をあげる為には大きな柱であると思うので、この点について最近一読した本を紹介して参考にしたい。

最初に牧野 昇著「超技術」の中の一節を紹介する。その中に「新しい科学技術者の条件」として大変興味深いレポートが記載されている。

アメリカにおける11の研究機関に従事している1,311人の科学技術者の研究レポートと研究業績を5ヶ年間にわたって詳細に追跡調査した報告で、研究者の専門領域の広さと貢献実績の関係を図表で表示しているが、その結果によると専門領域をなるべくよけいに持つことや、多様な知識を持っている人の方が、専門をしぼってその道のみ研究をしている人よりも、よい成績をあげているという厳然たる事実が判明したというもので、レポートをまとめた著者もその結果に驚いたと発表している。

研究者が専門分野のみに偏しているよりも、「インターディシプリナリー(学際的)」な人間で、境界領域の知識にも強く、柔軟な頭脳の持主であることが必要である。専門分野のみに徹した研究者の共同研究では、往々にして「谷間の存在」があり、

---

立派な交響楽を演奏することは出来ない。特に日本人は欧米人に比較してこの傾向が強いとされている。

現実の問題として耐震設計はよい例であると思う。耐震工学は地球物理学から地質学、地震学、土木工学、建築工学等、多くの分野に関連した複雑な工学であり、総合的な立場に立って学際的研究が最も要望される部門であるが、各分野の専門科学技術者は自己の専門分野による研究のみにこだわり、境界領域の関連技術を軽視する傾向が強く、適切な学際的研究が出来ていないように思う。

次に紹介するのは、B・E・ノルティンク著「研究人間」で、「科学技術者の創造性を生かす道」を副題とした本である。

研究開発の重要性については、常に研究開発の評価や、テーマの選択といった問題のみに論議が集中される傾向があり、研究者の創造性をフルに引出すにはどうしたらよいかといった研究開発の本質に立入った論議は皆無に近いことを強調している。

研究者は特殊な人種であり、その心理の機微をつかみ、実際研究の行われている状況を把握してこそ、高度の創造的な成果を期待できるもので研究者の意欲を向上させることの重要性を研究機関としても十分に認識することが欠かせない重要な問題であると提言している。

研究者の意欲を向上させる為に「電力賞」を設定して高度の成果をあげた研究グループを電気事業として表彰してはどうであろうか。

電研は研究人員が500人を越す大型の充実した研究機関であり、電気事業のために重要な成果をあげ得る素質を十分に備えていると思う、「三人よれば文殊の知恵」ということもあり、知能集団としての電研も、マン・マン・システムを適切な運用によって学際的な総合力を発揮し、成果ある研究開発の実績を着実に発揮されることを期待する。

関西電力株式会社 取締役副社長

工学博士 吉田 登

〔電力中央研究所 参与〕

電研・UHV 送電研究の歩み(昭和43～57年4月)

昭和 (西暦)	月	電力中央研究所	月	所 外
43 (1968)	4 —	「送電機能向上に関する研究報告—その4—直流送電」(送電機能委員会報告書)を作成 UHV 送電について予備的検討を開始、「UHV 送電に関する考察」を取りまとめ		
44 (1969)	8	基礎研究用サイリスタ変換装置を開発(日立製作所と共同開発)		
45 (1970)	12 — —	「直流連系に関する研究報告(その1)、(その2)」(送電機能委員会報告書)を作成 直流送電線の絶縁について研究開始 北海道・本州直流送電線(電源開発)の設計検討基礎資料を作成	—	直流±40万ボルト級送電米国で実運転開始
46 (1971)	4 10 —	高電圧直流ケーブルについて基礎実験、開発研究を開始(電力各社、古河、住友、藤倉、日立との共同研究) 直流送電計算盤1号機を開発設置(49年2号機設置) 直流送電線下のイオン流帯電について研究開始	—	米国内務省ボンネビル電力庁直流±60万ボルト試験線完成
47 (1972)	5 11 —	「UHV 送電の技術的問題点」を作成 直流送電系統異常電圧シミュレータ開発設置 UHV 送電研究推進委員会を設置	3	米国に電力研究所(EPRI)設立
48 (1973)	—	交流 UHV 送電について予備的研究を実施	1 5 — —	佐久間サイリスタ試験所で試験開始(8社共同) 初の50万ボルト送電開始(東京電力・房総—新古河間) 米国 EPRI—GE・交流100～150万ボルト試験線完成 中央電力協議会に UHV 開発推進委員会設置
49 (1974)	9	重点研究3課題(UHV 送電、原子力発電、環境保全)設定		
50 (1975)	4 4 9 10	UHV 送電赤城実験場を設置(56.6に赤城試験センターに統合) 電力技術研究所設置 最初の UHV 送電海外調査団を派遣(電力各社と共同派遣) 直流多端子集中制御装置開発設置	—	ソ連動力電化省・交流120万ボルト試験線完成
51 (1976)	9 9 — —	カナダ IREQ(ハイドロクベック研究所)設備により UHV 級がいしの人工汚損耐電圧試験を実施 EPRI—GE(ゼネラル・エレクトリック社)プロジェクト UHV 実証試験に参加、BPA(米国内務省ボンネビル電力庁)試験線での UHV 実証試験に参加 送電線コロナ騒音・雑音実験装置、直流イオン流帯電予備実験設備、がいしピン電食実測設備、直流課電曝露電源回路検証実験設備設置 UHV 送電第一次ステップ(基礎事項)研究開始	— —	イタリア電力公社・交流110万ボルト試験線完成 電線業界 UHV 実用化にむけて本格的な取り組み開始
52 (1977)	4 7	長期電力需給問題研究会発足 財超高压電力研究所の事業を継承、研究機関の一組織として超高压電力研究所を設置(54.7に武山試験・研究センターと改称)	12 — —	新信濃周波数変換所運開 米国内務省ボンネビル電力庁交流110万ボルト試験線完成 米国電力会社交流150万ボルト試験線完成
53 (1978)	12 12	UHV 送電特別委員会設置、第2次ステップ(開発研究)研究開始(中央電力協議会の依頼による) UHV 送電線建設技術部設置(~57.7)	9 —	中央電力協議会 UHV 送電技術開発方針を決定 日立、東芝、三菱電機、富士電機各々 UHV 推進委員会を設置
54 (1979)	2 7	UHV 霧中実験棟完成 UHV 送電特別委員会に直流部会を設置	12	北海道—本州間の直流送電線運開
55 (1980)	5 12	UHV 送電交流目標電圧を公称100万ボルトに決定 UHV 赤城試験送電線完成、機械的試験等を開始	6	中央電力協議会、次期最高送電電圧を公称100万ボルトに決定
56 (1981)	3 6 6 12	「2000年電力需給の展望」を公表 UHV 送電吹米調査団を派遣(電力各社と共同派遣) UHV 塩原実験場設置 相間開閉サージ実験設備設置		
57 (1982)	2 3 4 —	UHV 赤城試験送電線により100万ボルト課電試験を開始 UHV 送電特別委員会中間報告書作成 直流プラスマイナス65万ボルト試験送電線完成(UHV 塩原実験場) 直流多端子送電集中制御方式を開発(日立製作所と共同開発)		



第 一 章

結 語



# 緒言

電力技術研究所 副所長 瀬田 泰助

我が国の最高送電電圧は現在500kVであるが、この運転が開始されたのは今から9年前の昭和48年である。

思い起すと、500kV送電の技術開発について当所で本格的に試験研究を始めたのは、運転開始の更に10数年前の昭和30年代中頃からであった。当時は高い電圧を採用することに伴う絶縁設計が最重要視され、各種試験研究が進められたが、がいし連の長さが5～6m、ブッシングの長さが7～8m程度というような数字が出てきたとき、果してこのように大きなものが実現可能であろうかと、随分議論されたものである。



ところが、500kV送電の技術開発が一段落した頃から、既にその次の送電電圧である UHV に対する検討が開始された。

これには電源立地の遠隔化、大容量化とか、1 ルート当りの送電電力を大きくして送電線用地を少なくする必要性とか、系統の拡大による短絡電流の増大の抑制とか、いろいろな要因があるが、この間における技術の進歩と、次から次へと大きくなる技術者の夢も大いに関連があるのではないだろうか。

とにかく500kV送電の運転が開始された直後の昭和48年には、中央電力協議会に UHV 開発推進委員会が設けられ、UHV 送電に関する検討が具体的に開始された。

当所では500kV送電に関する研究に引き続いて、UHV を対象とした基礎的試験研究を行っていたが、同委員会に協力して、さらにカナダの IREQ で UHV 級がいし連の汚損耐電圧試験を実施するとともに、米国の EPRI—GE および BPA における UHV 試験線による実証試験に研究者を参加させ、それらの結果を委員会に提供した。

このように同委員会が目的とした、いわば第1次ステップの研究は昭和53年にはほぼ終了し、引き続いて送電線・機器の開発研究と系統運用に関する研究を主目的として、UHV 送電特別委員会が中央電力協議会の要請により当所内に設立された。この委員会には各電力会社を始め、大学、官庁、メーカーなど各界の関係者が参加し、昭和53年11月に当所の山田直平理事を委員長として、我が国のいわば総力が結集された委員会が発足した。

この委員会では、UHV に関する研究の効率化を計るため、まず我が国で採用する UHV 送電の目標電圧について検討が行われた。すなわち800kV、1,100kV、1,200kV、1,500kVの4案を対象として、技術面、経済面および環境面から総合的な検討が加えられ、その結果、最高電圧1,100kV、公称電圧1,000kVを我が国の UHV 送電の目標電圧にすることが適当であるとの結論が得られた。

同委員会ではその後、引き続いてこの目標電圧に対して、系統、絶縁、線路、機器、環境の各分野から検討を進め、交流 UHV 送電に関しては、信頼性のある送電線・変電所の実現が可能であるとの見通しを得、昭和57年5月、中間報告を作成して交流送電に関する審議を終了した。なお同委員会では今後 UHV 直流送電に関する調査検討が進められる予定である。

当所ではこの間、各種試験研究を行ってその結果を委員会に提供してきた。特に昭和54年には武山試験センターに UHV 霧中実験設備を建設して、大形がいし・がい管の所要長さについて実証的試験研究を開始するとともに、UHV 塩原実験場に UHV コロナケージを設置して必要な電線導体数などについて実験を行ってきた。

これらの結果は、UHV 送電特別委員会における審議に反映され、概念設計の基礎データとして活用されている。この概念設計による UHV 送電線は、当然のことながら鉄塔もがいし類も従来の500kV送電線より格段に大形であり、また電線も500kVのときの4導体に対して、UHV の場合には8～10導体程度の大きなものが必要となる。

このような大形な送電線では、少しの設計の差異が技術的にも経済的にも大きな影響を与える。従って果してこの概念設計による送電線が予期した性能をもっているか否か、さらに小形化し得る可能性があるか否かは重大な問題であり、実規模の実証試験によって確認検証する必要がある。

このため当所では昭和54～57年に赤城試験センターに UHV 実規模試験送電線を建設するとともに、塩原実験場に相間開閉サージ実験設備を設置し、大形鉄塔の動特性、コロナ障害抑止対策、相間間隔の開閉サージフラッシュオーバー特性などについて、実証試験研究を開始した。

このような状況は海外においても同様である。すなわちアメリカの AEP、EPRI—GE、BPA、イタリアの ENEL、ソ連の動力電化省などでは実規模の UHV 試験送電線を建設して実証試験を行っており、またカナダのハイドロケベック、フランスの EdF では巨大な高電圧実験設備を建設して各種実験研究を実施している。

これらの研究状況あるいはその結果については、先に述べたように UHV 開発推進委員会、UHV 送電特別委員会の主導のもとに可能な限りの調査を行って研究の効率化を図ってきたが、例えば海外の UHV 送電線はすべて1回線を指向しているのに対し、我が国では用地の有効利用の観

点から2回線の送電線を考えており、海外の結果をそのまま我が国には適用できない所がある。また台風や地震など我が国特有の苛酷な気象・環境条件に対する設計は、独自に研究しなくてはならない。

当所ではこのように我が国で特に必要な研究項目を選定して、先に述べたような各種の試験設備を建設して実証的研究を進めている。その結果、既に赤城試験センターに建設した UHV 試験送電線により、海外に例のない2回線の大型鉄塔であっても、動的に充分安定した設計が可能であることをほぼ確認することができた。今後これらの設備により、我が国に適応した UHV 送電線の実施結果が、逐次明確化されるものと期待している。

なお当所では UHV 直流送電線についても並行して試験研究を行っている。直流送電線はその大きさが交流の場合より小形にできるなどのメリットがあるが、実績が少くかつ直流特有の検討すべき課題も多い。

特に変換所を含む交直流系統の運用制御方法、直流系統に発生する異常電圧とその抑制法、直流によるがいし連その他のフラッシュオーバー特性、送電線下のイオン流帯電抑止対策などが直流の場合問題であり、UHV 送電特別委員会でも先に述べたように、今後、直流を主体として審議を進める予定になっている。

当所では多端子直流系統シミュレータ、サージシミュレータなどによる系統関係の研究、がいし類の直流汚損耐電圧試験、直流ケーブルの長期課通電試験などを実施してきたが、昭和57年6月には、更に直流400～650kV級の直流双極2回線の試験送電線を塩原に建設し、イオン流帯電その他に関する実証的試験研究を開始した。また昭和58年3月には大規模な直流電力系統シミュレータを粕江事業所に設置し、交直流系統の運用制御方法について実証的研究を開始する予定である。

以下は、現在までに当所で実施してきたこれら UHV 交流および直流送電に関する各種の基礎的ならびに実証的試験研究結果と、実規模の試験送電線などの実証試験設備の概要を紹介したものである。

我が国の UHV 送電の実現は、今後なお10年程度、後になると予想されるが、当所の研究成果あるいは設備がそれに大きく貢献するものと信じている。またその項には、その次の夢に対する新たな技術者の挑戦が始まっていることであろう。

海外のUHV(交流1,000kV、直流±600kV以上)プロジェクト

国名	機関名称	交流 直流	UHV送電計画			
			電圧 (kV)	場所	距離 (km)	目的・時期
アメリカ	アメリカ電力会社 (AEP)	交流	1,600	オハイオ州 インディアナ州 ウェストバージニア州	1区間 300~400	現在の765kV系統と同じ地域に1,500kV級送電系統を1990年代に導入予定、ASEA社と共同研究
	エネルギー省 ボンネビル電力庁 (BPA) Bonneville Power Administration (BPA)	交流	1,300	ワシントン州 オレゴン州	1区間 300~400 (平均200)	ワイオミング、モンタナに建設中の石炭火力、大容量のピーク用水力など8~10GWをカスケード山脈をこえて西へ送電する現在の230kV線路2回線を建てかえUHV送電を行うなど、用地節約が目的、1985年頃より線路の一部を建設し、昇圧は1990年代の見込
		直流	±400 ∪ ±600	太平洋岸(南北) 連系線の第2線	約1,700	北部の水力電源地帯と南部の火力・原子力発電所との季節的融通、時期未定
イタリア	電力公社 (ENEL)	交流	1,050	南部の原子力発電所から北部の工業地帯へ送電	数百km	現在の400kV系統と同一地域に1,050kV系統を導入する、1983~1984年に約15kmの線路を建設、UHV実負荷試験、1990~1995年昇圧予定
ソビエト	電力電化省	交流	1,200	シベリヤ中央 カザクスタン	約2,000 (3区間)	シベリア地区の大水力、石炭による電力の超長距離輸送、5,000MW、1981~1985年にイタアト~ノボズネック間に270kmの線路が完成する 1985年頃昇圧予定
		直流	±750	エキアバスツーズ~欧ソセンタ	2,500	アジア地域の石炭による電力の超長距離輸送、6,000MW 1984年一部、1987年全部運開予定
ブラジル	ELETRO BRAS ↓ FURNAS	直流	±600	イタイプ~ サンパウロ 6,300MW	830 (2回線)	パラグアイとの国境のパラナ河(水力全計画12.6GW)よりブラジル南部および南東部へ送電する 1983-84年完成目標 残りはAC750kV、900km、3回線、2開閉所の建設を検討している

UHV送電特別委員会 海外調査報告、CIGE資料、IEEE等より引用。

海外のUHV試験送電線

所在	相数	こう長 (m)	径間	導体径、数 (cm×導体数)	地上高 (m)	相間距離 (m)	電源設備	付属設備
デュモン (レイクビル) AEP [米 国]	1	915	3	3.05×18 配置 122φ	最小15 最大30	対地絶縁 距離 12.2	単相對地 2,250/√3 kV	コロナ試験ケージ、6.1~9.1 m(可変)四角断面、30m、2 組
ピッツ フィールド GE [米 国]	3	525 中央径間 はこの内 340	3 但し 中央主径間	3.3×8(8.9、8) &12、16 配置50~125φ 試験終了	最大20~30 (鉄構梁45)	水平配列 相間9~ 24可変	3相1,500kV (対地866kV) 3台	コロナ試験ケージ 5.34m角×61m長、7.6m角× 15.2m長、霧中実験室24m八 角形、高さ24.4m
ピッツ フィールド GG [米 国]	2	160	1	3.3φ×4	13.7	13.2	±750kV	DOEの委託による±600kV までの電界・イオン効果の試 験
	2	525 中央径間 340	3	5.59φ×6 配置 101.6φ	(15~24.5) 最大24.5	(12~32) 当面24.5	±1,500kV (1980年)	EPRIの委託による±600~± 1,200kVの長期試験
ライオンズ BPA [米 国]	3	2,010	7	4.07×8 配置 106φ	支持点で 28~32	水平間隔 21.6~27 垂直間隔 18~18.6	3相 1,100kV 50MVA 3台	送電線下で牧畜(牛)、養蜂、 農作物栽培を行い、影響が生 じないことを検証している
モ BPA [米 国]	1	1,700	5	4.07×8 配置 106φ	多導体電線のギャロッピング、サブスパン振動、スパーサ、着氷、保 守工法の研究用			
ザ・ダラス BPA [米 国]	2	2,030	17	4.6×2	平均15.2	18.3	±600kV	試験終了、閉鎖
		2,740		3.05×4	平均15.2	11.2		
スベレト ENEL [イタリー]	(3)	1,000	3	3.15×12まで 可変	(鉄構梁) 56.5	12.0	単相對地 800kV×2	コロナ試験用ケージ 円筒形1組、IG 6 MV 500KJ
ブラダレナ ENEL [イタリー]	1	525	1	3.15×8まで 2.28×12まで	多導体電線のギャロッピング、サブスパン振動、スパーサの研究用			
ベリーラスト (モスクワ) [ソ 連]	3	1,200	3	2.35×8	最小13 (実用線は) 14.5~21	24~26	単相對地 900/√3 kV 1,300/√3 kV	しゃ断器、電圧変成器、電流 変成器2相分
レニングラード [ソ 連]	2	350	1		17		±750kV	直流1,200kVに高調波500kV を重畳した長期課電電源設備 1980年開始



第 5 章

UHV 交流送電

## 第2章 UHV交流送電 ● 目次

2-1 要 旨	14
2-2 絶縁の信頼性評価	16
2-2-1 緒論と結論	
2-2-2 過電圧	
2-2-3 送電系統の絶縁	
2-2-4 送電線の絶縁信頼性	
2-2-5 変電所の絶縁信頼性	
2-3 障害防止	22
2-3-1 緒論と結論	
2-3-2 コロナ騒音	
2-3-3 ラジオ雑音・テレビ雑音	
2-3-4 テレビゴースト・しゃへい	
2-3-5 オゾン	
2-3-6 静電誘導	
2-3-7 生物への影響	
2-4 機械力(鉄塔の動的安定性)	26
2-4-1 緒論と結論	
2-4-2 赤城実規模試験線における動的試験	
2-4-3 数値解析による検討	
2-4-4 自然外力による応答の観測	
2-4-5 UHV鉄塔の動的安定性	
2-5 系統技術	32
2-5-1 緒論と結論	
2-5-2 送電モデルと基本系統特性	
2-5-3 特有の系統技術問題とその解決策	
2-6 実証試験	40
2-6-1 緒論と結論	
2-6-2 赤城試験送電線	
2-6-3 課電設備	
2-6-4 関連測定設備	
2-6-5 実証試験の進め方	
2-6-6 相間絶縁間隔の検証	

執筆者紹介：( )内は担当箇所、順不同

瀬田 泰助：電力技術研究所 副所長(2-1)

沢田 嘉嗣：電力技術研究所 系統絶縁部 部長(2-2編集担当、2-2-1)/尾野 孝夫：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室 室長(2-2-2)

新井 昇：電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室 室長(2-2-3)/渡辺 泰夫：電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室(2-2-3)

半田 栄：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室(2-2-3)(昭.57.7.31付退職)/鈴木 俊男：電力技術研究所 系統絶縁部 調査役(2-2-4)

三谷 弘：電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室 室長(2-2-5)/宅間 董：電力技術研究所 系統絶縁部 次長(2-2-5、2-3-6)

竹下 信也：電力技術研究所 電子応用部 部長(2-3編集担当、2-3-1)/福島 充男：電力技術研究所 電子応用部 電気環境研究室 室長(2-3-2)

笹野 隆生：電力技術研究所 電子応用部 電気環境研究室(2-3-3)/豊田 栄：電力技術研究所 電子応用部 電力通信研究室(2-3-4)

矢田部照夫：エネルギー・環境技術研究所 環境化学部 大気化学研究室 室長(2-3-5)/藤原 喬：生物環境技術研究所 緑地生物部 植物環境研究室 室長(2-3-7)

坂本 雄吉：電力技術研究所 専任研究員(2-4全部、2-6全部)/町田 武彦：電力技術研究所 電力システム部 部長(2-5全部)

# UHV交流送電

電力技術研究所 副所長 瀬田 泰助

大容量の電力を遠方から大需要地に経済的に送る方法として、現在の電圧の2倍である100万ボルト級（UHV：ウルトラ・ハイ・ボルテージ）で送電することが望ましいとの観点に立って、実証試験を含めた総合的な研究を推進している。

電力需要の伸びは鈍化したとはいえ、2000年を展望すると、現在の2倍以上になると想定され、しかも、電源は遠隔化、大容量化の一途をたどっている。この大電力を遠隔地から大消費地に経済的に送電するためには、国土が有効利用でき、送電損失が少なく、故障時の電流が少ないUHV交流送電を実現させる必要がある。

当所はこのため中央電力協議会の指針の下に、架空送電鉄塔や系統の経済的で適正な設計をするため、主に、送電線の碍子や線間の絶縁設計、コロナ騒音・ラジオ雑音などの障害の防止、電力系統の設計について研究を推進すると共に実規模試験送電線により実証試験を行っている。実証試験では、高さ約100メートルの鉄塔3基を径間300メートルで設置し送電線を添架した試験送電線を用いて、地震や台風に対する安全性と障害防止対策の実証を行っている。

## UHV送電は電気的高速道路です



# 2-1 要 旨

電力技術研究所 副所長 瀬田 泰助

送電電圧1,000kV級の UHV 交流送電線を実現するためには、絶縁、環境、系統技術など検討すべき課題が多い。

このため当所では、大学、電力会社、メーカなど、各方面の関係者の参加する UHV 送電特別委員会を設置して審議を進めているが、これと併行して各種の基礎的試験研究を推進している。

その結果、以下本章の各項で述べる成果を得たが、更にその結果を実証し、信頼性の高い設計データを得るため、赤城試験センターに UHV 実規模試験送電線、UHV 塩原実験場に相間開閉サージ実験設備を建設した。

本章ではこれらの概要を述べるが、その要旨は下記の通りである。

## I. 絶 縁 設 計

絶縁設計面では、鉄塔の大きさに直接影響を与える気中絶縁間隔および碍子連の長さなどが重要な問題となる。これらの大きさは大きくすればそれだけ安全になるには違いないが、少しの増大が経済性に大きな影響を与える UHV 送電線では、必要最少限の大きさ、いやそれよりもできるだけ小さくする工夫が重要である。

気中絶縁間隔は主として遮断器開閉時などに送電線に発生する開閉サージに耐えるように設計される。

従って気中絶縁間隔を小さくするためには、系統に発生する開閉サージの大きさをなるべく小さくすることがまず重要であり、遮断器の抵抗投入および抵抗遮断方式、性能の優れた避雷器の設置など、現状で考えられる方策について解析を行った。

その結果、対地開閉サージの常規対地電圧波高値に対する倍数は、1.6倍程度(500kV送電線の場合は2倍程度)に抑制可能であるとの見通しが得られた。

一方このような開閉サージに対する気中絶縁間隔のフラッシュオーバー特性は、絶縁間隔を増大してもそれに比例してフラッシュオーバー電圧が上昇しないいわゆる非直線性をもっ

ており、かつ電極の形状によっても大きな影響を受ける特徴がある。海外でも米国、カナダ、フランスなどで実験検討が行われているが、それらの結果は必ずしも一致せず、特に相間間隔に問題が大きい。

送電線を小形化する限度を究明するためには、これら特性の明確化は必須であり、このため当所では、塩原実験場に実規模の供試鉄塔と開閉サージ発生装置を建設し、実証試験を開始した。

他方送電線に使用する碍子連と、変電所用ブッシングの大きさは、主として汚損湿潤時における耐電圧によって決定される。このため海外でも大形長連碍子連の汚損耐電圧について実験が行われているが、結果に重大な問題点が含まれている。

すなわち海外の一部で発表されている汚損耐電圧と碍子連の長さとの関係には非直線性があることであり、もしこれが事実であるとすれば、UHV 用碍子連の長さは電圧比例以上に大きなものにしなければならない。

これらの点を解明し、信頼性のある設計データを得るため、当所では昭和54年に武山試験研究センターに UHV 霧中実験設備を建設し、UHV 用の高強度長連懸垂碍子および大形碍管の霧中耐電圧特性を詳細に求めた。この結果上述の非直線性は実際上は無視し得ることを確認するとともに、大形碍管も笠形状を改良することにより、全長を予測より短かくし得ることを実証した。

## II. 障 害 防 止

UHV 交流送電線の電線は、10導体とか8導体とか従来にはない多導体が必要とされているが、その主な原因はコロナ騒音、ラジオ雑音などの電氣的障害を従来の500kV送電線と同等、あるいはそれ以下にすることを目標にしているからである。

換言すれば、UHV 交流送電線の導体方式は、コロナ騒音などの障害防止対策によって決定され、その影響する所

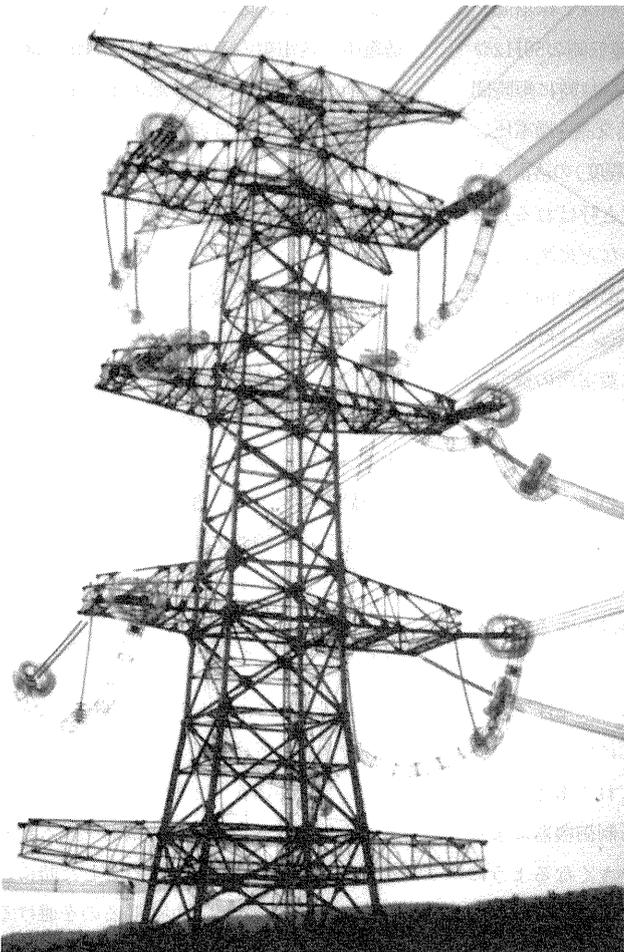
は絶縁設計に劣らず極めて大きい。

当所ではこのため塩原実験場にUHV コロナケージを建設して、多導体電線のコロナ騒音、ラジオ雑音などについて基礎的研究を進めるとともに、米国のEPRI(米国電力研究所)-GE(ゼネラルエレクトリック社)およびBPA(米国内務省ボンネビル電力庁)におけるUHV試験線による実験に研究者を参加させ、データを入手して解析を行った。

これら研究の結果、コロナ騒音の予測手法を開発するとともに、電線のエージングあるいは表面処理の有効性などを確認し、今後、次項に述べる実規模試験線により、障害防止対策の実証を行う計画である。

### III. 実証試験

UHV 交流送電線については、上述のように海外でも試験送電線などを建設して試験研究を行っている。これはUHV 送電線が従来のものより格段に大形となるので、総合的



UHV実規模試験送電線（赤城試験センター）

性能を検証する実証試験が必要不可欠となるためである。

特に我が国では、用地の効率化を計るためにUHVでも2回線送電線を考えており、海外で検討している1回線送電線より更に大形になるばかりでなく、地震、台風など我が国特有の苛酷な気象条件、環境条件に適応しなければならない。

当所ではこのため、UHV送電特別委員会の概念設計に基づいて、赤城試験センターに鉄塔3基2径間、巨長600mの実規模の2回線UHV試験送電線を建設した。

この試験線の主な目的は、大形鉄塔の機械的安定性の検証と、コロナ騒音など前項に述べた障害防止対策の実証である。

大形鉄塔および送電線の機械的安定性については、建設の進行に合わせて、基礎単体、鉄塔単体、架線後の連成系の各段階において、起振機を使用した動的試験を行うとともに、シミュレーションモデルを開発してこれによる解析を行い、両者がほぼ一致することを確認した。なお現在引き続き地震、強風などの自然外力に対する応答を待機観測中である。

また障害防止対策については、UHV級電圧を課電して10導体を対象として各種測定を現在開始しているが、近い将来8導体に導体数を変更して実測を行い、最適導体数その他の明確化を図る計画である。

### IV. 系統技術

UHV送電特別委員会で検討しているモデル系統を対象として、基本潮流、短絡電流、安定度などの計算、解析を実施したが、UHV交流送電系統で特に問題となる点は、線路の充電容量が従来の500kV系統にくらべて格段に大きいことである。

このため、例えば線路充電時にフェランチ効果により電圧上昇が発生するとか、発電機の遅れ力率運転が確保できないとか、負荷遮断時に原子力発電所がスクラムする可能性が生ずるとか、いろいろの問題が惹起される。

これらの問題はUHV交流送電系統に特有なものであり、線路の充電容量を補償するため適切な分路リアクトルを設置する必要があり、その容量ならびにその設置方法などについて詳細な解析検討を行った。

なお分路リアクトルを設置すると、線路開放時に共振性過電圧が発生するなど、新たな問題も生じ、この抑制対策など、今後なお検討すべき課題が残されている。 ●

## 2-2 絶縁の信頼性評価

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 部長 沢田 嘉嗣

### 2-2-1 緒論と結論

UHV 送電においては、電力輸送量が従来の送電線に比べて飛躍的に増大するので、一段と高い絶縁の信頼性が要求される。一方送電電圧が高いため、送電線や変電所は大型とならざるを得ない。このために、経済的で信頼性の高い合理的絶縁設計が必要となる。

送電線の絶縁設計には、先づ、常規の交流電圧の他に、系統に発生する過電圧を明らかにし、それら過電圧に対して事故が生じないように、或いは生じても極めて稀であるように、送電線の大きさや各種電力機器の絶縁強度を選び、最後に送電線および変電所全体の信頼性を評価することが肝要である。

当所は、現在迄の経験と実績に基づいて、UHV 送電特別委員会に全面的に協力し、送電線および変電所の絶縁設計に貢献した。

即ち、系統に発生する過電圧の解析については、当所のサージシミュレータ(TNA)と大型コンピュータによってUHV送電線に発生する各種過電圧の大きさや波形を詳細に予測した。

絶縁設計の基礎資料となるがいし類や気中絶縁間隔(クリアランス)の絶縁破壊特性については、これまで当所を含めて世界各国で多くの報告がある。

これらの結果を整理統一するとともに、UHV 級の絶縁破壊特性が従来の結果の延長に在るか否かを確認するために、実規模のがいし類や鉄塔装柱を用いて、武山試験センターおよび塩原実験場で実証実験を実施した。一部は現在、継続中である。

また、UHV 級概念設計を対象として、

当所の雷サージ計算盤や大型計算機を使用し、新しくプログラムを開発して、雷および開閉サージによる事故率の計算を実施し、絶縁信頼性評価の資とした。

以上の結果を UHV 送電特別委員会に反映させ、現在の技術を駆使することにより、500kV送電線と同等、またはそれ以上の絶縁信頼性を有する、UHV 送電が可能であるとの見通しを得ている。(沢田 嘉嗣)

### 2-2-2 過電圧

送電線の電線と電線間、電線と鉄塔間、およびがいしには、正常運転時の50Hzや60Hzの交流電圧の他に、事故時に短時間(通常は秒オーダー)に生じる交流性過電圧、非常に短時間(10万分の1秒程度)の落雷により生じる過電圧(雷サージと呼ばれる)、およびシャ断器を開閉した時などに生じる、交流性過電圧と雷サージとの中間的な継続時間を持つ過電圧(開閉サージと呼ばれる)が加わる。これら過電圧は変電所の機器にも加わる。

電気を安定して供給するためには、これらの過電圧で事故を生じないようにする必要があるが、そのためには、どの過電圧が、どれ程の大きさで発生するかを知り、それに対して送電線や機器の設計をする事が必要である。

また、UHV 送電は非常に高電圧であるため、機器や送電線も非常に大型になる。したがって、避雷器と呼ばれる電圧抑制機器や、発電機に付加される制御機器によって、過電圧が出来るだけ小さくなるようにし、それによって、送電線や機器の寸法を小さくする事が要求される。

このような目的のために、各種過電圧の

解析を行った。例を次に示す。

#### I. 交流性過電圧

送電線で1つの相が地絡事故を生じると、他の健全な相の電圧が上昇する。この電圧上昇によって、そこが更に事故を生じると事故の拡大となるため、この過電圧で事故を生じないようにする必要がある。色々な条件のもとで多数の解析を行い、UHV 系統では正常時の電圧の1.16倍の過電圧となる事が分った。

また、UHV 送電は長距離となるため、送電中に送電線の末端で、急に線路全部がシャ断されると、やはり過電圧が生じる。

この対策としては発電機に高速の制御装置を用いること、および送電線と途中の開閉所に分路リアクトルを設置して送電線のキャパシタンスをほぼ100%キャンセルする必要がある事が分った。

しかし、このような分路リアクトルが設置されると、線路両端を切り離れた時に、送電している線路からの電磁誘導によって、大きな過電圧を生じる場合がある。

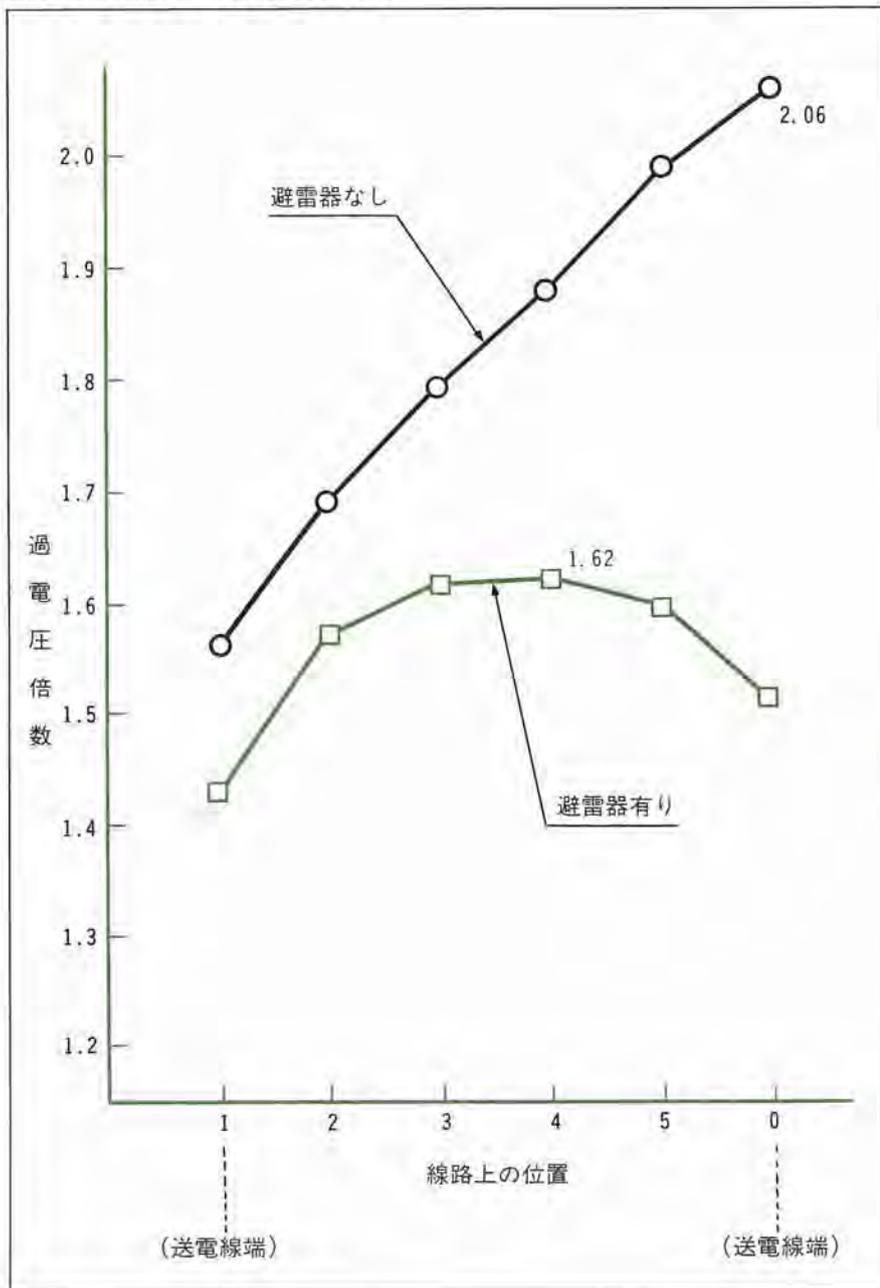
分路リアクトルと過電圧の関係について解析を行い、線路に直接設置できる分路リアクトル容量の範囲を求めた。

#### II. 開閉サージ

前述のように、シャ断器を開閉した時も、開閉サージと呼ばれる過渡的な過電圧が生じる。事故電流をシャ断器でシャ断した時や、事故が無くなってシャ断器を投入することにより、再び送電しようとした時に、この過電圧で再び事故が生じるのを避ける必要がある。

図2-2-1は、解析結果の1例であり、送

図2-2-1 開閉サージの大きさの解析例



電線路上で過電圧がどのように変化するかを示している。また、送電線の両端に避雷器が設置されると、どのように過電圧が小さくなるかも示している。

多くの条件を変えて解析した結果、現在考えられている過電圧抑制方法では、最悪の場合、対地過電圧は約1.6倍、相間の過電圧は約2.9倍になると予想された。更に過電圧を抑制する方法と、その大きさについて、引き続き解析する予定である。

(尾野 孝夫)

### 2-2-3 送電系統の絶縁

電力が安全に輸送されるためには、前節の異常電圧に耐えるように、送電線や変電所の絶縁が設計されなければならない。合理的な設計のためには、がいし類やホーン、導体間等の気中クリアランスの絶縁特性を明らかにする必要がある。

また、一旦、送電線の絶縁が破壊しても雷によるフラッシュオーバーのように一過性の現象であれば、短時間のうちに、再び送電

も可能となる場合があり、このためには、絶縁破壊時に発生するアークの特性を把握しておく必要がある。

当所では、UHV級の各種絶縁特性の実証試験を実施し、UHV送電線の絶縁設計の資とした。

#### I. がいし・がい管類の耐電圧特性

UHV送電線を大地から絶縁して保持するため、がいし連やブッシングを用いるが、これらのがいし類は、厳しい気象条件にさらされることが多い。すなわち、多量の塩分を運ぶ台風や、季節風などによって、がいしはその表面に汚損を受け、また降雪地域では冠雪や着雪を受ける。

これらの原因によって、がいし類の絶縁性能は一時的に低下することがあるが、その場合にも支障なく電力を輸送するためには、がいしは長大にならざるをえない。

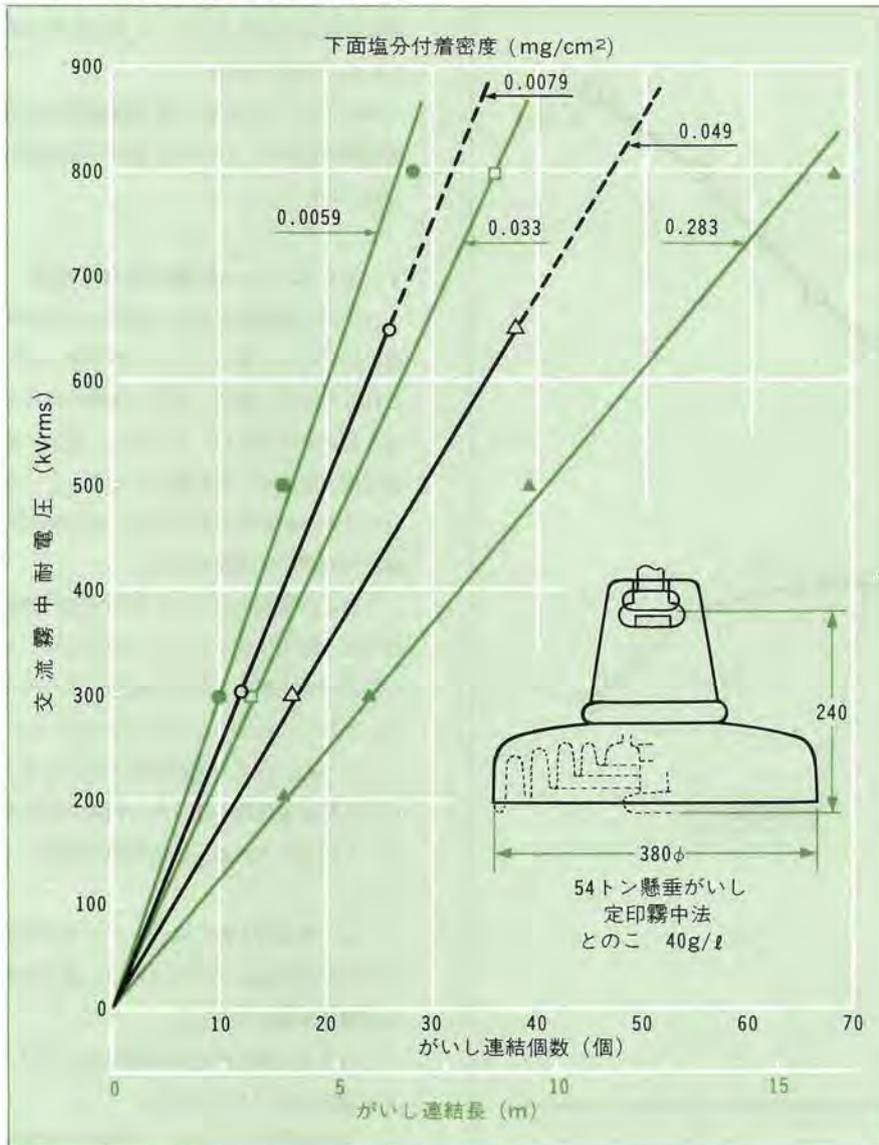
このため、自然の湿潤状態を再現できるUHV霧中実験棟を使って、汚損の程度やがいしの長さや耐電圧との関係を調査している。

一方、東北電力㈱と共同して、米沢変電所内で500kV級までの冠雪がいし連の耐電圧実験を実施中である。

これまで得られた主な結果は、次のように要約することができる。

1. 送電線用がいし連や、変電所で使用するブッシング用のがい管の汚損耐電圧は、UHV級の電圧まで、がいし長に比例して高くなる。例として、54トン懸垂がいしの連結長と霧中耐電圧との関係を図2-2-2に示す。
2. 内陸部を通過するUHV送電線は、石こうを主成分とするじんあい汚損を受けるが、石こう汚損がいし連の耐電圧も、がいし長に比例する。
3. がいし・がい管類の耐電圧と、それらが汚損される度合との関係を明らかとした。
4. 山岳地のがいし連には、雪が積ることがあるが、これら、冠雪がいし連の耐電圧と雪の性質との関係を定量的に明らかにした。

図2-2-2 がいし連結長と耐電圧との関係



以上のような結果は、UHV 送電線のがいし個数や、ブッシング長の決定のための基礎資料として、UHV 交流送電線の耐汚損設計に反映されている。(新井 昇)

## II. 気中フラッシュオーバー特性

気中大ギャップのフラッシュオーバー特性の研究については、当所は古くから実績があり、UHV 級のフラッシュオーバー特性に関しても、以下の成果を挙げた。

### 1. 交流霧中フラッシュオーバー特性

当所、武山試験研究センターの UHV 霧中実験棟において、蒸気霧を発生させて、長

ギャップのフラッシュオーバー電圧を測定したところ霧のない場合と比べて、異常に低い電圧でフラッシュオーバーする現象が見出された。

この現象は、送電線の絶縁信頼性の上で、重要な問題であるので、更に詳細に研究を実施した結果、霧中のフラッシュオーバー電圧の低下は、霧の温度が高いほど大きいことが明らかとなった(図2-2-3)。

この結果、自然の霧の温度(25℃以下)では、通常実施される開閉サージに対して必要な気中絶縁間隔(クリアランス)を確保しておけば、霧によるフラッシュオーバー事故の心配はないとの結論を得た。

### 2. 開閉サージフラッシュオーバー特性

UHV 送電線の気中クリアランスは、「2-2-2」に述べた開閉サージに対して、フラッシュオーバーが発生しないように決められる。したがって、開閉サージに対する気中ギャップのフラッシュオーバー特性を調べることは、送電鉄塔の小型化にとって非常に重要である。

当所では、がいし装置を付けた簡単な送電鉄塔のモデルを用いて、実験を実施し、開閉サージフラッシュオーバー特性に及ぼす開閉サージ波形の影響、ギャップ長の影響、鉄塔の支持アーム巾など電極構造の影響等、基礎的特性を明らかとし、これら特性を解析して一般式を提案した。

また、送電線の各相に開閉サージが加わった場合の相間サージに対するフラッシュオーバー特性は、上述の要因以外に、各相に加わる開閉サージの大きさの比や、その時間のずれ等によって、著しい影響を受ける。このため、送電線の気中クリアランスを決定するためには、実際の送電線の形状に出来るだけ近いもので、フラッシュオーバー特性を求めることが望ましい。

当所では、UHV 塩原実験場の設備を補強し、開閉サージフラッシュオーバー特性を評価するための実規模試験を実施している(図2-2-4)。

### 3. 雷サージフラッシュオーバー特性

雷サージに対するフラッシュオーバー特性についても、当所の従来の実験データを整理すると共に、実規模級の碍子装置を用いて実験を行い、フラッシュオーバー電圧と時間の関係を明らかとし、UHV 絶縁設計の資とした。(渡辺 泰夫)

## III. 送電線のアーク現象(再閉路)

雷や塩害等によって地絡事故が発生した場合、地絡相の線路両端をしゃ断器で開放することによって、事故アークを除去する。その後、短時間(例えば2秒)経過後に、しゃ断器を再び投入して送電する方式を高速度再閉路方式と言い、無停電送電と系統の

図2-2-3 棒一平板ギャップの交流霧中フラッシュオーバー特性

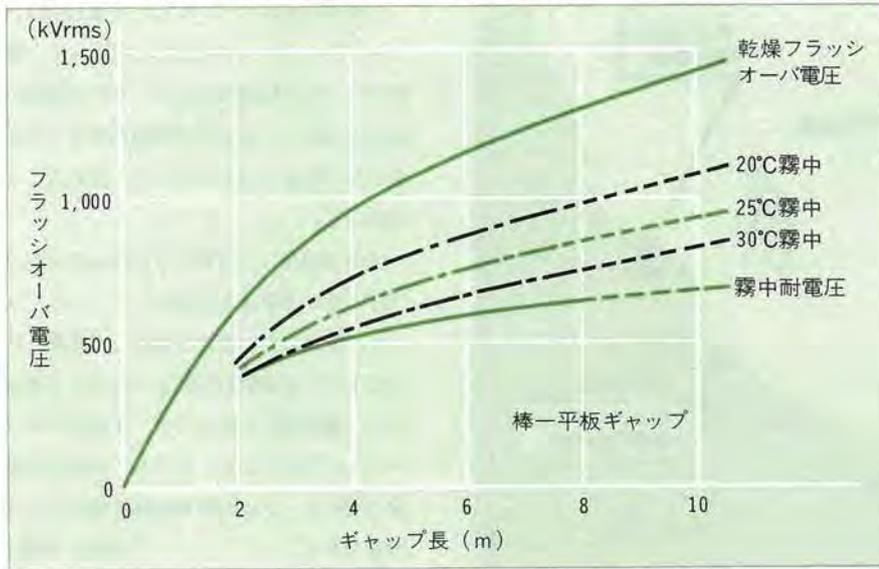


図2-2-5 対流と風で伸ばされていくアーキ

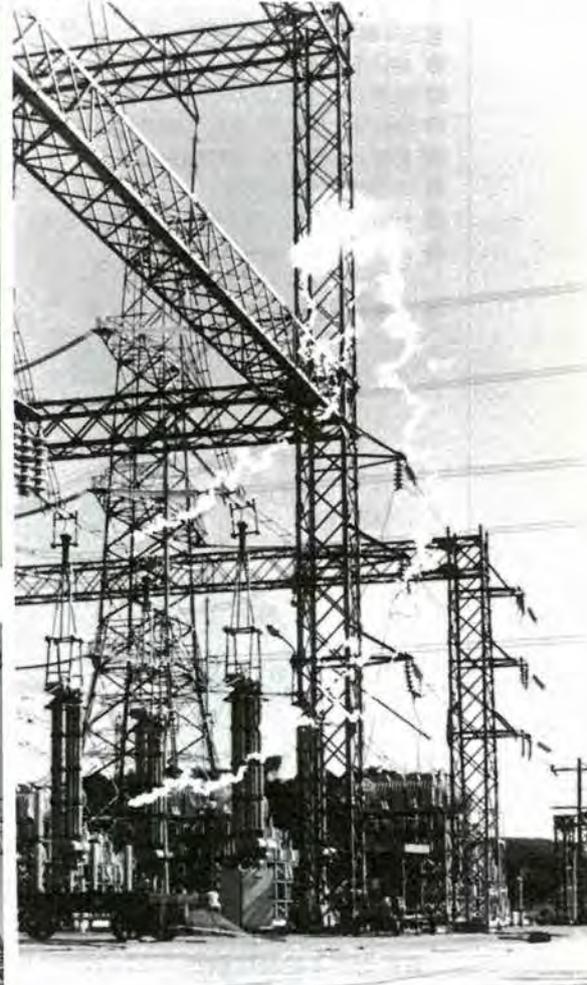


図2-2-4 8 導体—8 導体の相間フラッシュオーバー試験



その一つは、線路端に接地用しゃ断器を設置する方法である。もう一つは、線路直付分路リアクトルの効果を利用する方法であるが、リアクトル特有の現象が生ずるため、それに関する実験と考察を進めている。絶縁回復時間を UHV 級の長ギャップについて測定するには、実験回路に特別な装置が必要であるが、最近これが完成し、目下実験を進めている。

その他、がいし装置の耐アーキ性能、送電線のアーキによる損傷等に関する試験も当所で鋭意すすめられ、設計に反映された。  
(半田 栄)

### 2-2-4 送電線の絶縁信頼性

送電線の絶縁信頼性は、雷と開閉サージによる事故率を計算し、従来の実績と比較して評価される。

安定な運用に重要である。

しかし一般には、健全相からの静電誘導により、小電流(例えば100アンペア程度)のいわゆる二次アーキが続く。このアーキは、自分自身の熱による対流と風の影響で伸ばされていき、自然に消弧する(図2-2-5)。この時間を自然消弧時間という。

また二次アーキが自然消弧した直後は、まだ高温ガスが周囲に残っていて、絶縁が弱いので、そのまま送電を始めると、事故が再発する可能性がある。

これを防ぐためには、地絡個所の絶縁が十分に回復するまで再閉路を待たねばならない。この時間を絶縁回復時間という。

消弧時間は風速や、回路条件など多くの要因に左右される。当所ではそれ等の要因を考慮した計算式を開発し、種々の系統条件における消弧時間の推定に役立てている。

UHV 送電では、二次アーキの自然消弧時間は、一般にかなり長いので、高速度再閉路を可能にするためには、これを短縮する工夫が必要となる。

図2-2-6 雷性状の実測対象選定地点と測定器の配置



## I. 雷に対する絶縁信頼性

雷による事故率は、対象とする送電線の地域の雷の性質を想定し、送電線が雙雷に対して保護される(雷遮蔽という)か否かを判定し、線路に発生した雷サージによって、気中間隔(クリアランス)の絶縁が破壊するか否かを判定することによって求められる。

当所では、各電力会社の協力を得て、耐雷設計基準委員会および雷害事故委員会で雷事故の分析調査を行っている。UHV送電線の雷事故率を予測する上で参考となる現行500kV送電線の雷事故実績として、線路100km当り年間約1件の結果を得ている。

また、雷に対する設計の基本となる雷の性状を把握するために、夏季雷に対しては赤城UHV試験線において、冬季雷に対しては、日本海側に電力設備をもつ東北、東京、北陸の各電力会社と共同して、図2-2-6に

示す地点にて、昭和53年度より雷観測を実施している。

この雷観測は、雷が落ちてくる様相や、鉄塔に流れ込んだ雷電流の波形などが自動的に記録される、当所で開発した多角的無人装置を使って行っており、現在までに、雷の極性、雷電流の波形とその大きさ、雷の持続時間、雷撃経路など貴重な成果を挙げている。

雷事故率の予測手法としては、現在アームストロング・ホワイトヘッド(A-W)手法が専ら利用されているが、これに対して、長ギャップ放電のモデル実験に基づいた雷撃頻度に関する「放電路モデル」や、試験送電線の実験に基づいた雷過電圧の伝搬に関する新計算法を提案し、従来の予測手法の見直しを活発に行っている。

UHV特別委員会の計算結果によれば、UHVモデル送電線の雷事故率は、500kV送電線の約25%に低減されると予測される。

## II. 開閉サージに対する絶縁信頼性

送電線の開閉サージに対する事故率は、サージシミュレータ(TNA)によって、開閉サージを多数回発生させ、その送電線の変化を追跡し、各鉄塔で事故が発生するか否かを判定することによって、求めることが出来る。

当所で開発した計算プログラムにより、UHV級の送電線を対象として、クリアランスと事故率との関係を調査した結果、UHVモデル送電線の開閉サージによる事故率は、開閉操作1回につき、1相当り $10^{-3}$ ~ $10^{-4}$ と予測された。これは、500kV送電線の開閉サージに対する絶縁信頼性とほぼ同等である。(鈴木 俊男)

### 2-2-5 変電所の絶縁信頼性

変電所は、人間の身体に例えれば、心臓と同じように電力輸送の要となるところである。

したがって、その絶縁設計に当っては、あらゆる事象を想定した信頼度の高い設計が必要である。

変電所の絶縁を脅かす量も大きな過電圧は、何んと言っても雷撃による過電圧である。

UHV変電所を構成する主要機器は、ガス絶縁開閉装置と変圧器、分路リアクトルであり、すべて内部絶縁機器であるため、変電所機器の絶縁協調を検討するためには、運用上考えられる各種の母線構成を対象にして、最苛酷な雷撃条件のもとに、変電所に発生する雷過電圧(以下雷サージと呼ぶ)を予測する必要がある。

検討の対象となるUHV変電所は、図2-2-7に示す通りで、分路リアクトルの適用とともに、避雷器を被保護機器に複数個以上適用するのは、UHV変電所が初めてである。

変電所の絶縁協調の基盤となる避雷器特性は、酸化亜鉛形避雷器(C特性)が適用されている。

最も苛酷な雷撃条件を想定して、運用上考えられる母線構成を、引込口回路にとつ

て苛酷なケースと、母線回路にとって苛酷なケースに分類し、避雷器が1組または2組のときの電位上昇値を集約した。

引込口回路にとって苛酷なケースとは、線路側 CB 開放時に線路側から雷サージが侵入した場合で、侵入雷サージが開放端で反射するため、電位上昇最大値は4,000kV程度まで達する。

この場合、リアクトル近傍も3,700kVで避雷器の保護効果が及ばないが、さらに、リアクトル側にも避雷器を適用すれば、電位上昇値は2,240kV程度に抑制できる。

また、母線にとって苛酷なケースである送電線1回線に母線が接続された場合には、電位上昇最大値は、2,470kV程度になる。

以上、運用上考えられる母線構成をもとに、最苛酷な雷撃条件を想定して、母線回

路に発生する雷サージ電圧を予測したが、これらの値をもとに、雷インパルス所要絶縁強度が決定されるわけで、上記の結果から、雷サージ最大値に近い雷インパルス所要絶縁強度を、IEC(International Electrotechnical Commission)系列値から求めると、2,400kV~2,550kV辺りが指向されるものとする。

UHV 変電所は、変圧器を除いて全て、SF<sub>6</sub>ガスで絶縁することが予定されている。当所では、SF<sub>6</sub>ガス、混合ガス、スペーサ(支持用固体絶縁物)の絶縁特性に関して、多くの検討を行ってきたが、最近とりあげた問題は、次の2つである。

1. SF<sub>6</sub>ガスの短時間領域絶縁破壊電圧-時間(V-t)特性
2. 局所火花による絶縁特性の低下

1.は、ガス絶縁変電所の絶縁協調に関する問題で、SF<sub>6</sub>ガスの1マイクロ秒以下の絶縁破壊電圧(V)と、破壊時間(t)の関係調べたものである。

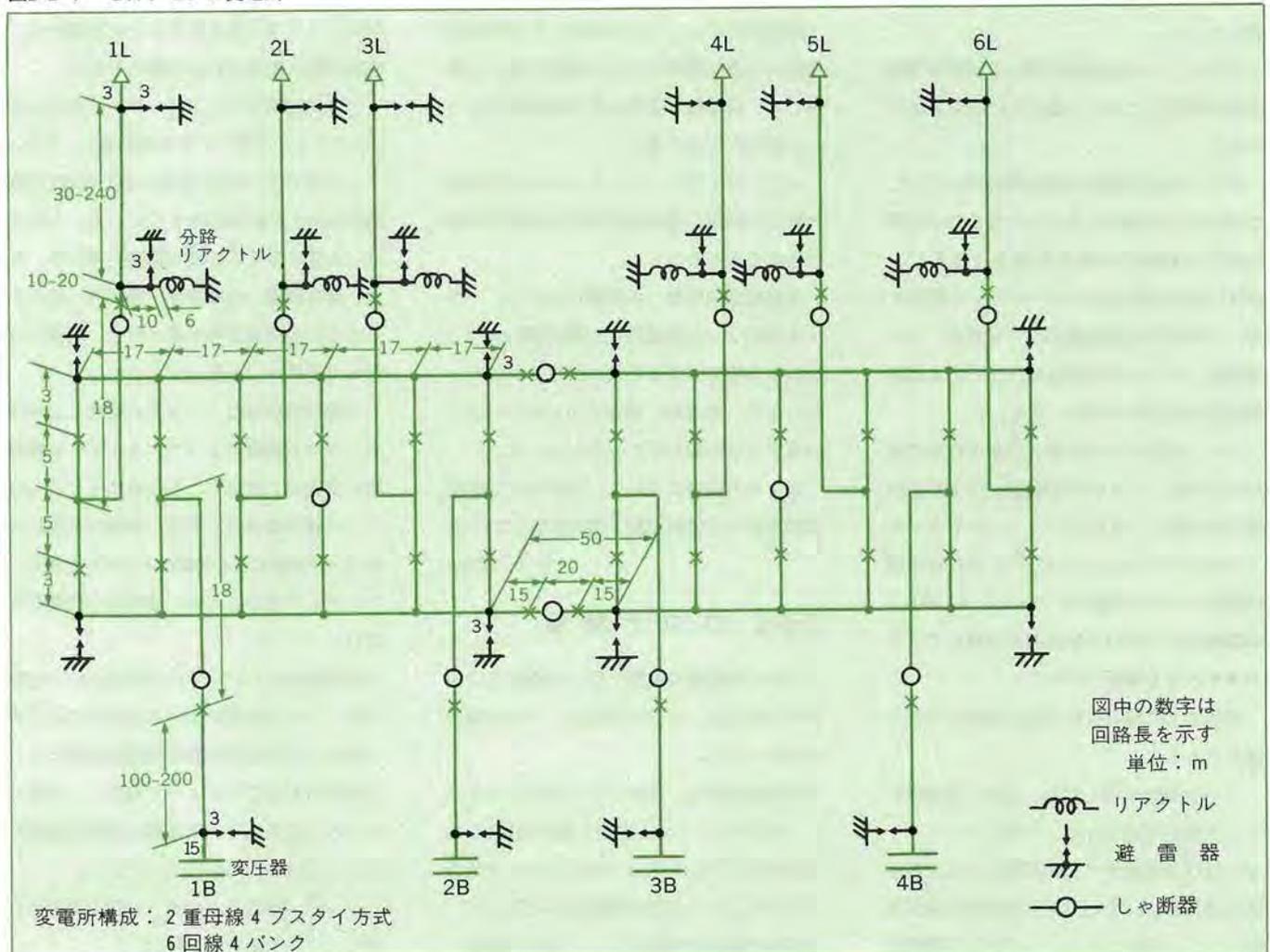
短時間領域の絶縁破壊電圧は、長時間領域とは逆に正極性電圧の方が低くなるのが初めて見出された。

2.は、断路器のように、局所の火花を生じたとき絶縁特性が低下する(機器の接地された容器まで放電が伸びて行く)機構を調べたものである。

この現象はSF<sub>6</sub>ガス中では、放電が自分の電界の力で伸びるためであること、絶縁距離を長くすることや、SF<sub>6</sub>ガスの圧力を高くすることは、ほとんど改善策にならないことなどを明らかにしている。

(三谷 弘、宅間 董)●

図2-2-7 UHV モデル変電所



## 2-3 障害防止

担当●電力技術研究所 電子応用部 部長 竹下 信也

### 2-3-1 緒論と結論

送電電圧の上昇に伴い、送電線路から発生するコロナ騒音、ラジオ雑音などの電気環境障害は、今後ますます重大問題化することが予想され、送電線の計画、設計に際し、十分な防止対策を構ずる必要がある。

とくに、UHV 交流送電線の設計において、コロナ騒音が導体方式を決定する主要素となるなど、いまや障害問題は、送電線自体の設計と密接にかかわり合う重要な課題となった。

当所は、コロナ雑音に関する研究を昭和28年に開始して以来、数多くの成果をあげてきた。

UHV 交流送電線の障害問題に関しては、交流500kV送電線におけるこれまでの当所の成果の積極的な活用を図るとともに、UHV 塩原実験場にコロナケージを新設して、UHV 多導体電線のコロナ騒音、ラジオ雑音、テレビ雑音特性などに関する基礎的研究を精力的に進めてきた。

また、海外における研究成果を有効に利用するため、アメリカ合衆国の EPRI(米国電力研究所)―GE(ゼネラル・エレクトリック社)のプロジェクト UHV、BPA(米国内務省ボンネビル電力庁)ライオンズ1,200kV 試験場に各3回づつ研究者を派遣して、データを入手し解析を行った。

現在までに得られた主要な成果はつぎの通りである。

コロナ騒音に関しては、UHV 送電線のコロナ騒音予測のため、UHV コロナケージにおける実測データを基盤とする予測手法を開発した。また、コロナ騒音の低減対策として、電線のエージングおよび電線表

面の特殊処理の有効性を明らかにした。

ラジオ雑音については、UHV コロナケージにおける雑音発生量は500kV以下の場合とほぼ同様であり、これまでの予測計算式を UHV 級にも延長適用できる可能性が大きい。また、テレビ雑音の試験用送電線の伝搬特性を検討した。

テレビゴーストと遮へいに関しては、500kV 送電線における成果を基礎として、UHV 送電線における障害発生領域を予測した。

静電誘導では、当所の開発した電荷重畳法および表面電荷法による電界計算法を使用して、送電線下近傍の長方形屋根のシールド効果などを計算した。

オゾンとは UHV コロナケージによる実験的検討の結果、発生量が極めて微量で無視できることがわかった。

交流電界の動物への影響について、マウスを250V/cmの高電界に6週間暴露したが、成長や血液に対する影響は検出されなかった。また、農作物、樹木とも100V/cm以下の電界では影響が認められなかった。

以上の各障害について、現在 UHV 赤城試験線による実証試験を鋭意推進している。

(竹下 信也)

### 2-3-2 コロナ騒音

UHV 送電線の電線には、多導体方式が用いられるが、その主目的は、コロナ騒音の低減である。

多導体電線は、図2-3-1に例を示すように、直径が3～4cm程度の素材電線(これを素導体と呼ぶ)を、円周上に6～18条並べて束にして1相分の電線とするもので、2回線送電線の場合には、これが6相分、

素導体の数にすれば36～108条架線される。

多導体電線の素導体数または素導体外径を増大することによって、コロナ騒音を減少させることができるが、これは、電線重量、鉄塔強度、工事量の増加を招くこととなり、送電線建設コストを上昇させるので、その適切な選定により、コロナ騒音障害の防止と経済性との協調を計ることが重要である。

コロナ騒音(AN: Audible Noise)は、主として降雨時の現象であり、電線表面に付着した水滴で発生するコロナ放電から、直接空間に放射される可聴音である。

コロナ騒音には、「ザーザー」あるいは「ジリジリ」と聞こえる不規則音と、「ブーン」と聞こえる変圧器音に似た純音(正弦波形音)の2成分が含まれている。これらは、人間に与える心理的影響が異なり、また、発生機構、伝搬特性、家屋内へ侵入するときの透過減衰等も違うので、両者を分離して取扱うのが便利である。

不規則音成分は「ランダム騒音」と呼ばれ、コロナ放電によってエネルギーが瞬間的に空気中に放出されるために生じるもので、一種の爆発音である。多数の水滴からのコロナ放電による急峻なインパルス音が、ランダムに重なるため、波形は白色雑音に近い。

純音成分は「コロナハム音(Hum)」と呼ばれ、コロナ放電によって生成されたイオン群が、電線周囲の商用周波数電界によって励振されることによって発生し、波形はほとんど正弦波で、周波数は商用周波数の2倍(100Hzまたは120Hz)である。

ランダム騒音とコロナハム音の両者を合せて「コロナ騒音」と呼ぶ。

図2-3-1 多導体電線の例

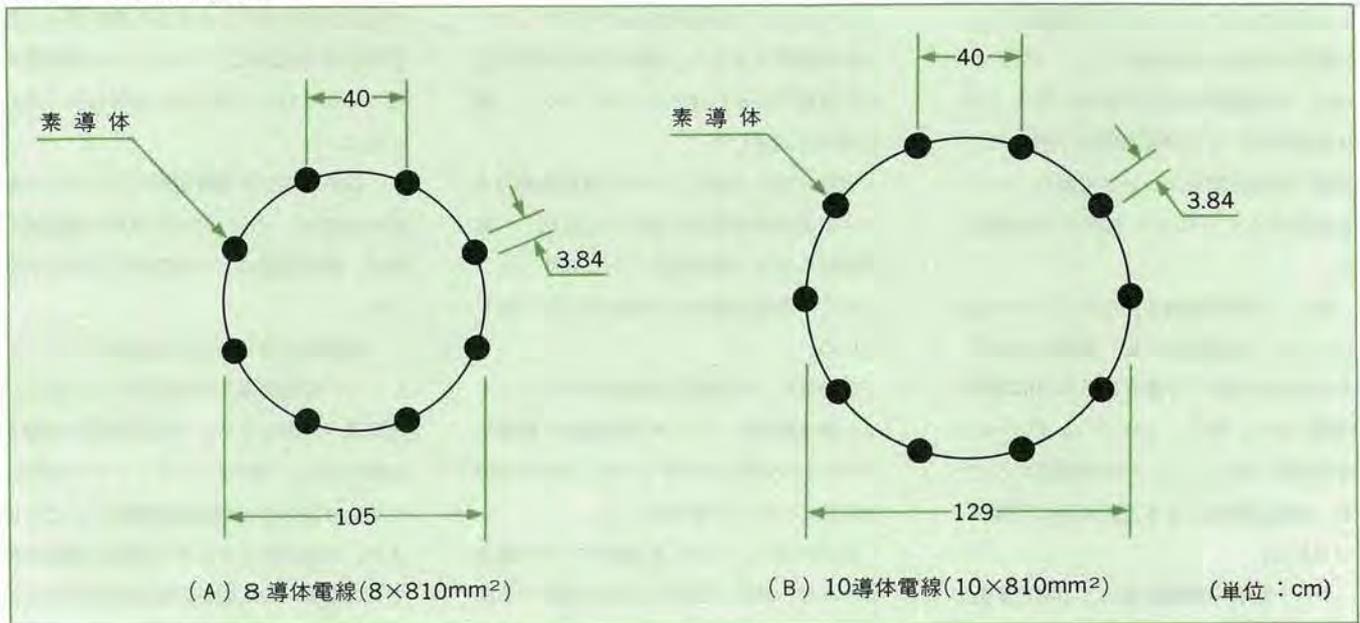
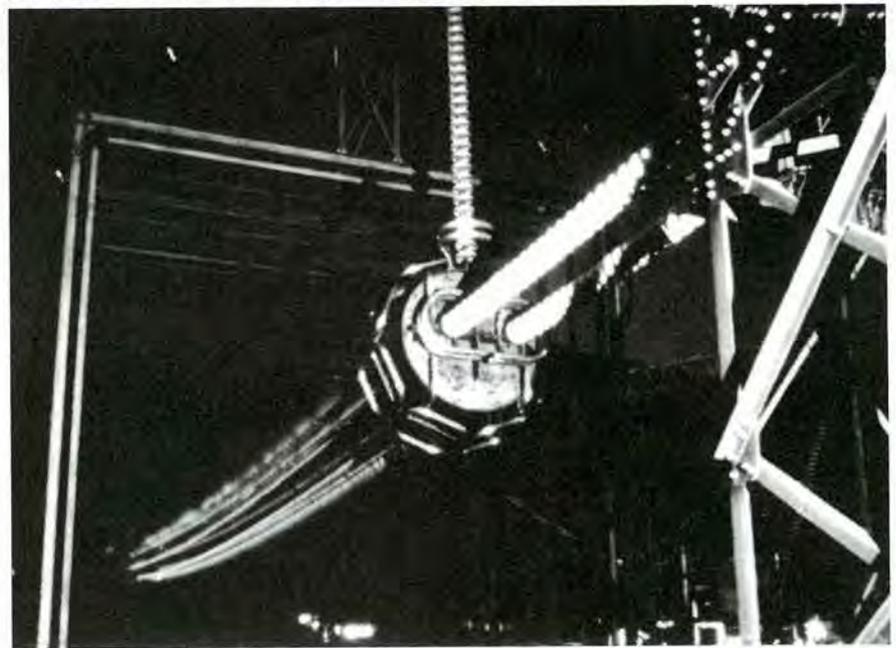


図2-3-2 コロナケージにおける多導体電線からのコロナ放電の発生



コロナ騒音が送電線の環境問題として注目されるようになったのは、アメリカで500kV送電が開始されて以来のことである。1960年代の後半に、500kV送電線、765kV送電線において、コロナ騒音に対する苦情が発生し、将来のUHV送電線における最重要課題の一つとして、海外において、精力的な研究が開始された。

一方、我が国では、「2-3-3」で述べる「ラジオ雑音」に対する規制が厳しい関係上、275kV、500kV送電線の電線を多導体化してコロナ放電の発生を極力抑制しているため、従来、コロナ騒音障害はあまり発生していない。しかし、UHV送電線については、我が国においても海外と同様に、コロナ騒音が電線設計における支配要因と考えられている。

当所においても、コロナ騒音に早期から着目し、昭和44年には、塩原実験場の試験線による予備的検討を開始した。また、昭和51年からは、前述の通り海外に研究員を派遣して、積極的にその成果の入手を計った。

さらに、昭和52年には、塩原実験場にUHVコロナケージを設置して、UHV送電線用の多導体方式電線のコロナ騒音特性に関する一連の研究を進めてきている。昭

和56年末からは、UHV赤城実規模試験線による実証試験を開始している。

コロナ騒音防止対策は、冒頭で述べたように、経済性との協調を計りつつ実施することが重要である。このためには、送電線周辺のコロナ騒音レベルを定量的に予測し、つぎに、その影響を的確に評価して電線設計に反映させる必要がある。また、必要な場合には、コロナ騒音レベルの低減対策を実施する。

すなわち、コロナ騒音の研究目標は、

1. コロナ騒音レベルの予測法
2. コロナ騒音の影響評価法
3. コロナ騒音低減法

の3手法を開発することである。

コロナ騒音レベルは、多導体電線からのコロナ騒音発生量とコロナ騒音の伝搬減衰とから予測計算する。

コロナ騒音発生量は、図2-3-2のように、短かい多導体電線をコロナケージ内に架線

し、電線周囲の電界の強さと分布が、実際の送電線と同じになるように課電してコロナ騒音を発生させて測定する。コロナケージは、供試電線の変更が容易であり、また、注水装置による人工降雨試験も可能なので、各種の多導体電線について実験し、データを蓄積することにより予測手法を開発した。

また、自然降雨時に発生するコロナ騒音レベルは、降雨強度に応じ変動するので、その統計的特性と予測手法との対応関係が問題であり、特に、コロナハム音については不明確であるので、これを検証することが、赤城試験線による実証試験の目標の一つである。

コロナ騒音の影響評価は、不特定多数の人間を対象とするため、純技術的には解明し得ない困難な問題も多いが、内外の既設EHV送電線(500kV)における実態の調査、心理実験などを実施しつつあり、地域の実環境・自然環境に応じた、コロナ騒音レベルの設計目標値選定法の開発を目指している。

コロナ騒音の低減法としては、電線のエージングや表面の化学的・機械的処理法の効果を電線メーカー各社との協力により実施しており、とくに表面処理は送電線建設直後の電線が新しい時期においては有効であることを確認している。(福島 充男)

### 2-3-3 ラジオ雑音・テレビ雑音

#### I. ラジオ雑音

架空送電線の電線からは、その最大導体表面電位の傾き(以下  $G_{max}$  と称する)がある値以上になると、大気中に向かってコロナ放電を発生することがある。

このコロナ放電は電波雑音として送電線に沿って伝搬したり、付近に放射し、周辺の無線受信機に受信障害を与えることとなる。この内ラジオ放送波帯の雑音をラジオ雑音(RI: Radio Interference)という。

500kV以下の送電線のラジオ雑音に関しては、実規模試験線による実測データにもとづき、ラジオ雑音レベルの予測計算式を

既に導いている。

これがUHV送電線にも適用できるかどうかを検討するため、導体方式を比較的容易に変更できるUHVコロナケージで、雑音電流を測定した。

実測結果によれば、ラジオ雑音電流の大きさは素導体外径の2乗にほぼ比例し、素導体数にはほぼ無関係なことが判明した。これらの事実は従来の予測計算式と一致している。

多導体による風騒音を低減させるスパイラル線の装着が、ラジオ雑音電流へ影響するかどうかを明らかにするため、 $10 \times 810 \text{mm}^2$ 多導体についての実測をした。

以上により、UHV送電線のラジオ雑音レベルの予測に、500kV以下の場合の予測計算式を適用できる可能性が大きい。

#### II. テレビ雑音

テレビ雑音は前項のラジオ雑音に比べ、歴史も浅く未だ基礎段階にある。

UHVコロナケージにおける $4 \sim 10 \times 810 \text{mm}^2$ 多導体のテレビ雑音電流(周波数100MHz)はラジオ雑音電流より20dB以上低い。

また、600kV塩原試験送電線により、テレビ雑音電流の距離による減衰定数を実測したところ、約20dB/kmを得た。これはラジオ雑音電流の減衰定数の数十倍にあたる。(笹野 隆生)

### 2-3-4 テレビゴースト・しゃへい

昭和39年に建設された275kV送電線によって、VHF帯のテレビ電波が反射されてテレビ受信機に映像が2重にうつる、テレビゴースト障害が横須賀市久里浜地区に発生した。当所はこれを契機として送電線の反射・しゃへいによるテレビ電波障害範囲の予測計算手法ならびに障害対策技術の開発等を目的としたテレビ電波障害対策の研究を開始した。

その後、昭和48年度より当社は本研究を重点課題としてとり上げ、模型実験ならびに理論的検討等により鉄塔および多導体電線によるテレビ電波の反射・しゃへい現象

の解明、ヘリコプターによるテレビ電界の地下高分布の測定、および各種計算および計算結果の図形表示プログラムの開発等を行ってきており、得られた結果は次の通りである。

1. 鉄塔および多導体電線によるテレビ電波の反射・しゃへい特性を求める理論式を導き、模型実験により理論の妥当性を実証した。

2. 送電線によるテレビ電波のゴースト・しゃへい障害領域を予測計算するためには、送電線へ入射するテレビ電波の強さを知る必要がある。当所は、ヘリコプターを用いたテレビ電界の実測結果を解析することにより、送電線がどのような場所に建設されても送電線への入射電界を計算で求められるようにした。

3. 1.、2.の成果より鉄塔ならびに送電線による、テレビゴーストおよびしゃへい障害領域を求める予測計算法を開発した。また、開発した予測計算法を平易に説明すると共に、現場での現象の理解に役立つようにガイドブックを作成した。

4. 電力各社において、テレビゴースト・しゃへい障害領域の予測ならびに障害対策を進めてゆく際、地形図上に送電線ルートに沿ったゴーストおよびしゃへい障害領域を、障害の程度に応じて色分けして表示でき、送電線ルートあるいは送信点等の変更にも速応できれば便利である。当所では、このような場合の予測計算ならびに計算結果の図形表示プログラムを開発した。

次に、UHV送電線によるテレビゴーストおよびしゃへい障害発生領域を、550kV、 $4 \times 410 \text{mm}^2$ 送電線の障害発生領域を基準にして予測計算を行い、つぎの事項を明らかにした。

送電線を電線と鉄塔に分けると

1. 電線によるゴースト障害発生領域最大値は、導体構成、しゃへい線の有無、テレビ周波数によって異なるが、550kV送電線のゴースト発生領域に対する拡大率は、VHF帯で0.7~8.3倍、UHF帯で1.7~10.2倍となる。

同じく、しゃへい障害発生領域の拡大率は、VHF帯で1.8~8.5倍、UHF帯で4.0~14.5倍となる。

2. 鉄塔によるゴースト障害発生領域は電線に比べてかなり小さい。また、しゃへい領域はほぼ鉄塔の高さに相当する距離内となる。

現在は障害発生領域の予測精動向上を図るため、実用送電線において実測データを集積すると共に、UHV級多導体電線の放射特性の模型実験等を行っている。

(豊田 榮)

### 2-3-5 オゾン

オゾンには、上空20~30kmのオゾン層で紫外線が空気中の酸素に作用して生成したものが沈降してくるような天然起源のものと、乾燥空気または酸素中で無声放電を行わせたり、窒素酸化物と炭化水素とが光化学反応を起して生成したりするような人工起源のものがある。

オゾンを主成分とする光化学オキシダントは、その環境基準が60ppb以下と定められており、間接的に自動車や火力発電所等は規制を受けている。

高電圧送電線の電線から気中コロナ放電によってオゾンが発生することは周知の事実であり、送電線高さ30mの場合、当所の実験結果を基に拡散式を用いてオゾンの地上濃度を求めると、降雨時0.6ppb、光化学オキシダントの発生しやすい晴天時0.06ppbとなるので、環境基準に対して影響が無視できる。

今後の計画として、当所、赤城試験センターのUHV試験送電線において長期の実証試験と、引続いて塩原実験場において直流送電の場合のオゾン発生に関する研究を行う予定である。(矢田部 照夫)

### 2-3-6 静電誘導

静電誘導は、高電圧の送電線が線下にある物体(たとえば傘、自動車、屋根)に作用して、電圧や電流を生ずる現象である。

我が国では、市街地で人が傘に触れたと

きショックを生じないという条件から、送電線の高さが決定されるので静電誘導は非常に重要な問題である。

静電誘導は、昭和50年頃我が国の50万V送電開始当時に種々の検討が行われ、最近ではアメリカのプロジェクトUHV(UHV研究計画)でさらに広範かつ詳細な研究が行われた。静電誘導の多くの問題はこれらの検討で取り扱われているが、最近大型計算機を用いた電界計算法が発達して、複雑な配置の静電誘導量をもっと正確に予測し、設計の合理化と障害の防止に寄与できるようになった。

特にUHV送電に関連して、当所が検討している内容に次のものがある。

1. 送電線の下にある自動車には、静電誘導によって(人が触れたとき)どれだけ電流が流れるか。
2. 送電線の下にある線(配電線など)には、どれだけ誘導電圧、誘導電流を生ずるか。
3. 地上の電界を低くするには、どのようなしゃへい線を張れば良いか。

当所では基礎技術の一つとして開発を進めてきた電界計算法による解析と、UHV試験線における実測とによって、これらの問題点を解明しつつある。(宅間 董)

### 2-3-7 生物への影響

#### I. 人体・動物への影響

送電線の電界の人体、動物への影響については広く欧米で研究されているが、我が国では電線の地上高を高くして線下の電界強度を抑制しているため、静電誘導の感知を除いては従来殆んど問題にされていなかった。

しかしUHV送電の研究を機に、当所において海外の研究現状の調査と動物実験を開始した。

海外研究の調査結果によると、志願者を対象とした短時間の実験では200V/cm以下の電界に30分以内暴露した場合、血液成分および刺激に対する反応時間に一時的な変化が認められたが、それは有害と考えられないと結論されている。一方、長期暴露の

影響を検討するため、数ヶ国で電力従業員の疫学的調査が行われたが、何れの調査も電界強度と累積暴露時間、電界以外の影響要因などの把握が十分でなかった。現在、これらの点を改善した新しい調査が進められてつある。

人を対象とした研究では実施の困難な長期暴露の影響“いき値”や遺伝的影響の解明などを目的として世界各国で種々の動物(マウス、ラット、ブタ、サル、ヒヒ等)を用いた動物実験が行われている。

当所では、海外で行われてきたマウスの電界影響実験法を検討して、長期暴露に適した課電用ケージを考案し、その成長および繁殖に及ぼす影響を検討中である。

実験の結果、250V/cmの電界を6週間に亘りマウスに暴露したが成長や血液に対する影響は検出されなかった。しかし動物実験においても電界の作用メカニズムや動物の体表面の電界、体内電流分布等が充分把握されていないため、その実験結果を人に適用する方法が確立されていない点に問題がある。このため国際的な協同研究を通じて、電界影響の評価についてより密接に情報を把握することを検討している。

#### II. 植物への影響

交流送電線下の植物に対する影響に関し、当所において、内外の文献を調査してきたが、これによると農作物、樹木とも電界強度100V/cm以下では障害の発生がみられない。実用線下においても、植物に対し、電界により障害が発生したという報告がない。

我が国においては種々の規制によって、電線の地上高が決められているおり、その電界(30V/cm)では植物の障害が発生しないものと考えられる。

植物のうち、高木となる樹木類は生長によって送電線に近づくことになるが、保安上必要な伐採幅などを求めるため、当所においては交流電界の影響実験、現地での調査(赤城試験線下)などを通じて基礎データを得るべく研究を推進している。

(藤原 喬)●

## 2-4 機械力 [鉄塔の動的安定性]

担当●電力技術研究所 特任研究員 坂本 雄吉

### 2-4-1 緒論と結論

UHV 送電線路用の鉄塔は、従来の鉄塔に比べ大規模でトップヘビーとなるため、地震や強風などの動的外力に対する安定性を検証し、動的荷重に対する現行設計手法の妥当性を確認することが重要である。

UHV 送電特別委員会、線路部会では以下の手順により、この問題を検討することを計画した。

1. UHV 赤城実規模試験線の動的試験により、動的特性(固有振動数、固有振動モード、減衰定数、伝達関数等)を把握する。
2. 動的試験結果と数値解析の結果を比較検討して、数値モデルと動的解析手法を検証する。
3. 試験線の地震や強風などの自然外力に対する応答の観測を行い、動的解析手法を再確認する。

4. 想定自然外力による試験線の動的応答解析を行い、試験線の動的安定性を確認する。

5. 試験線は径間数、径間長その他の面でワン・ポイント・データに限られるところから、鉄塔の剛性、径間数、径間長、がいし吊型などの諸条件を変えた場合について、上記で開発した手法を用いて、動的応答解析を行い、一般的な UHV 線路の動的安定性と現行設計法の妥当性を検証する。

これらのうち、4.、5.は一般的問題で、当所では主として赤城試験送電線の動的試験、数値モデルと動的解析手法の開発と検証、および自然外力に対する応答の観測を担当し、土木技術研究所と電力技術研究所が共同してこれに当たってきた。以下その概要を述べる。

(坂本 雄吉)

### 2-4-2 赤城実規模試験線における動的試験

#### I. 試験概要

##### 1. 試験の手順と地盤条件

動的試験の対象とした実規模試験線は、引留型の1、3号鉄塔と直線耐張型の2号鉄塔から成る巨長600mの3基2径間で構成されている。

試験線の動的特性を明らかにするためには、地盤、基礎、鉄塔および架渉線等の構成要素毎の動的特性を個別に明らかにすることが望ましいので、現地の地盤調査の後、建設工程に合わせて以下の3段階に分けて動的試験を実施した。

- (i) 基礎の動的試験(2号鉄塔B脚基礎)
- (ii) 鉄塔単体の動的試験(2号鉄塔)
- (iii) 架線後連成系の動的試験(3基2径間)

なお、現地におけるボーリング作業と原位置調査および室内土質試験の結果、鉄塔建設地点の地盤では、表層5～7mのローム層の下に粘性土あるいは砂礫層が存在し、せん断波速度はローム層で90～190m/sec、粘性土層、砂礫層では270～700m/secの範囲に分布していた。

##### 2. 試験方法

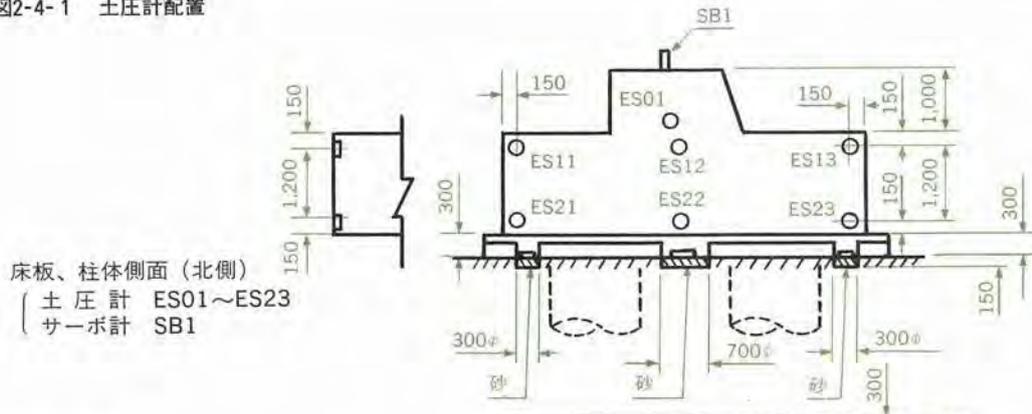
最大容量10tonの偏心重錘式起振機を用いた定常振動試験、起振機の急停止等による自由振動試験および常時微動観測を行った。定常振動試験法の概要を表2-4-1に示す。

また図2-4-1～3に、測点位置の例を示し、図2-4-4～5に起振機の基礎および鉄塔への据付け状況、ならびに計測装置を示す。

表2-4-1 動的試験の概要

	基礎の動的試験	鉄塔、3基2径間の動的試験
起振位置	2号鉄塔B脚基礎の床板上面と柱体天端上	2号鉄塔塔頂近辺 (地上高 92.5m)
起振方向	水平；線路方向 線路直角方向 上下方向	水平；線路方向 線路直角方向
起振振動数	0.5～25Hz	0.15～10Hz
測定物理量	基礎床板の変位、土圧くいおよび床板の鉄筋応力 周辺地盤の変位	鉄塔各部の変位、部材応力がいし連張力 基礎床板の変位
測定法	56点の同時測定	

図2-4-1 土圧計配置



床板、柱体側面（北側）  
 (土圧計 ES01~ES23  
 サーボ計 SB1)

B床板底面  
 (土圧計 EB11~EB33  
 サーボ計 SB2)

上視図

300φ(土圧計200φ)  
 3号 ←→ 1号  
 700φ(中央のみ)

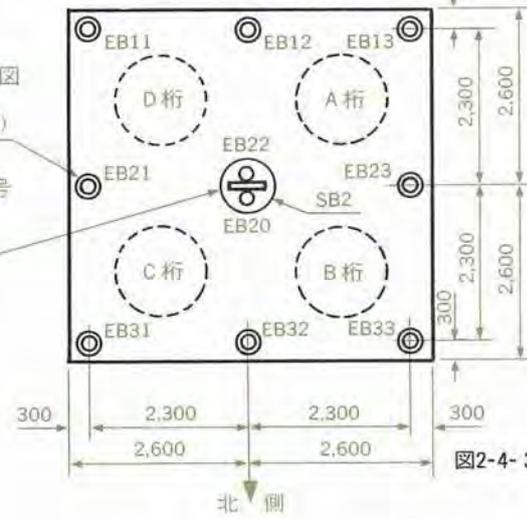


図2-4-3 架線後の測点配置

(サーボ計およびひずみゲージ)

レベル

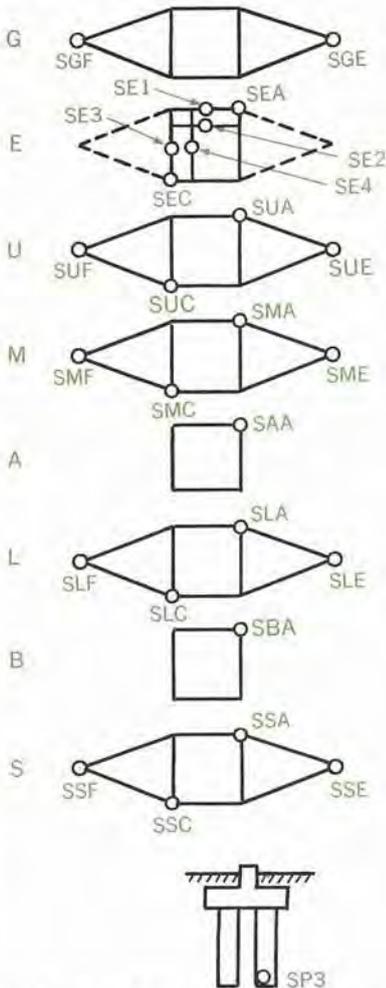
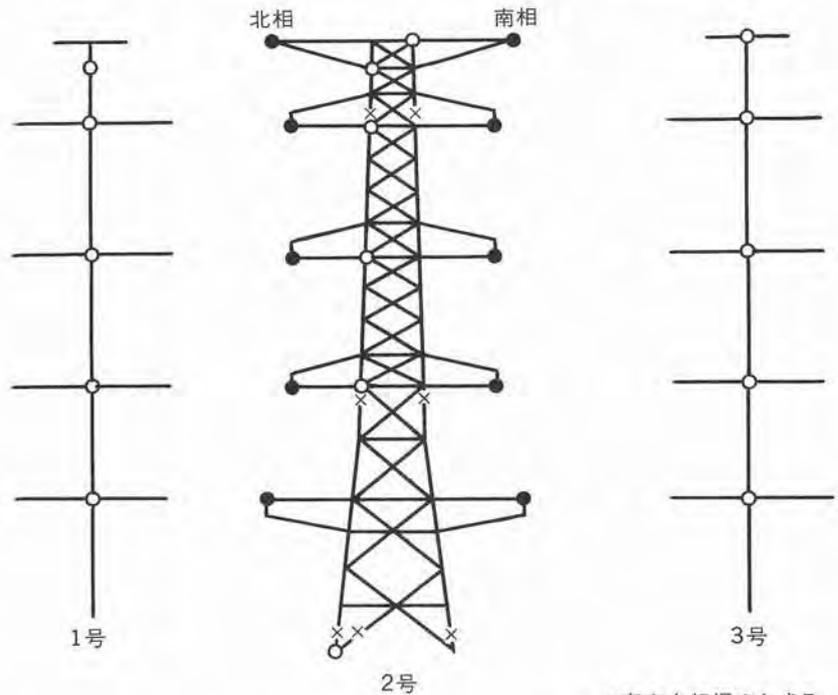


図2-4-2 架線前の測点位置（サーボ型加速度計）



× ひずみゲージ

サーボ計 { ○ 東方向起振のときE  
 北方向起振のときN  
 ● 東北方向起振ともEとD

## II. 基礎の動的挙動

2号鉄塔B脚基礎(逆T字型くい基礎、床板:5.2×5.2×1.5m、くい:1.3mφ×8m×4本)の起振機による定常振動試験と、常時微動測定により次の結果を得た。

### 1. 基礎の動的特性

基礎の水平方向挙動は、線路方向と線路直角方向とは、ほぼ同一であり、基礎の対称性は保たれている。共振線の1例を示す。

固有振動数および減衰定数は、上下方向で25Hz、35%、水平方向の1次で12Hz、21%、2次で22Hz、20%であった。

これらの結果から、基礎は上下方向には1自由度系、水平方向にはスウェー・ロッキングをする1質点2自由度系と見なすことができる。

### 2. くい基礎の動的特性に及ぼす影響

くい、床板、周辺地盤で構成した基礎全体の振動系でのバネ定数ならびに減衰定数が、くいに依存する割合はそれぞれ、上下方向で90%、50%、水平方向で50%、24%、回転方向で70%、37%である。

すなわち、基礎全体の振動特性に対して、くいの特性の占める役割は大きい。

### 3. 常時微動測定の結果

常時微動測定から求めた基礎の1次固有振動数は起振試験により求めたものと一致する。したがって、常時微動測定は簡易試験法として有効であると考えられる。

## III. 試験線の動的挙動

2号鉄塔(塔高97m、根開き18m、重量294tonの鋼管鉄塔)において、架線の前後に起振機による定常振動試験、自由振動試験を行い次の結果を得た。

### 1. 鉄塔単体の動的特性

2号鉄塔単体(架線前)の固有振動数と減衰定数を表2-4-2に、単位正弦波入力による各次の共振変位応答を図2-4-6に示す。これらの動的特性は、同一の高さを有する500kV級鉄塔に比して、弾性範囲内では特に差はないといえる。

図2-4-4 基礎に据付けた起振機

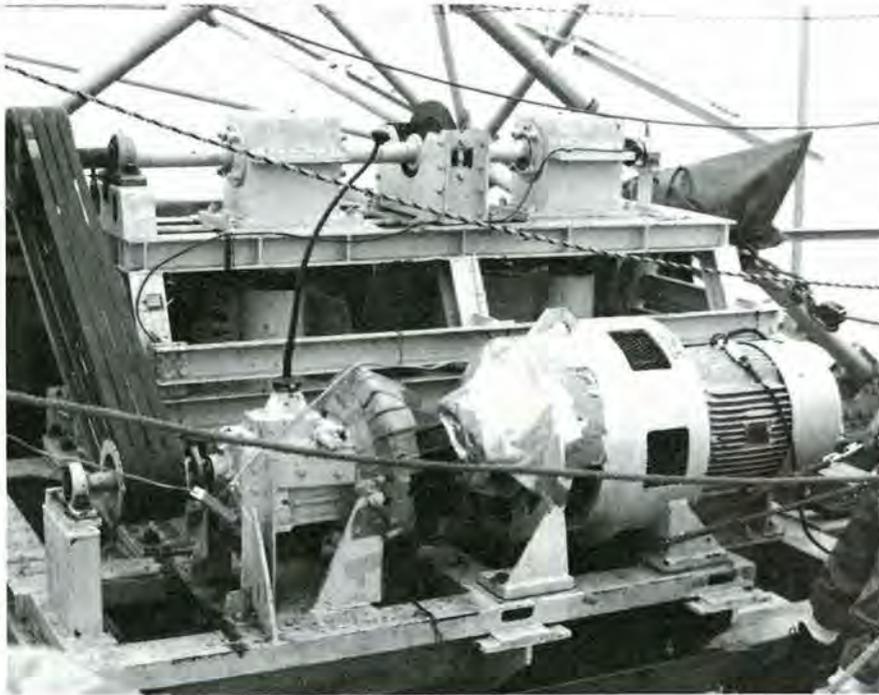


表2-4-2 架線前後の固有振動数〔(f)と減衰定数(h)〕

系	モード次数	起振方向		線路方向		線路直角方向	
		f・h	f (Hz)	h (%)	f (Hz)	h (%)	
架線前 鉄塔単体	1次	0.80 (0.76)	0.34	0.78 (0.75)	0.34		
	2次	2.68 (2.66)	1.18	2.47 (2.54)	0.63		
	3次	5.50 (5.33)		5.35 (4.84)			
架線後 連成系	電線モード	0.27 (0.29)		0.17 (0.18)			
		0.33 (0.30)		0.34 (0.35)			
		0.43 (0.39)		0.37			
		0.56 (0.53)		0.52 (0.50)			
	鉄塔1次	0.72 (0.75)		0.61 (0.57)			
	〃	0.92 (0.94)	0.26~0.36	0.72	0.29		
	〃	1.96		0.83 (0.74)	0.70		
	〃	2.14 (2.02)		0.92 (0.99)			
	鉄塔2次	2.54 (2.60)	0.31~1.75	2.39 (2.23)	0.75		
	〃	3.37 (3.15)		2.74 (2.85)	0.60~0.71		
	〃	3.54 (3.23)	0.41				
鉄塔3次	4.31						
〃	5.76						

注:( )内は計算値 数値モデルは下記のとおり2号鉄塔は立体骨組モデル 1、3号鉄塔は等価ビームモデル かいし、架渉線は30分割

図2-4-5 鉄塔に据付けた起振機



なお、架線前の鉄塔単体の固有振動数は、腕金回転慣性の影響により、線路直角方向のものがやや小さい。

2. 地盤・基礎が鉄塔の動的特性に及ぼす影響

地盤・基礎—鉄塔系の固有振動数の計算

値は試験値とよく一致する。

また、基礎完全固定と仮定した場合、基礎の数値モデルを用い地盤のせん断波速度を変えた場合について計算を行った結果では地盤のせん断波速度が60m/sec程度(N値にして0.5~10)にまで低下しても、地盤・基礎—鉄塔系の固有振動数は基礎固定の場合と変わらない。

したがって、通常地盤では鉄塔の基礎は鉄塔上部に比し剛であり、動的には固定されていると考えてよい。

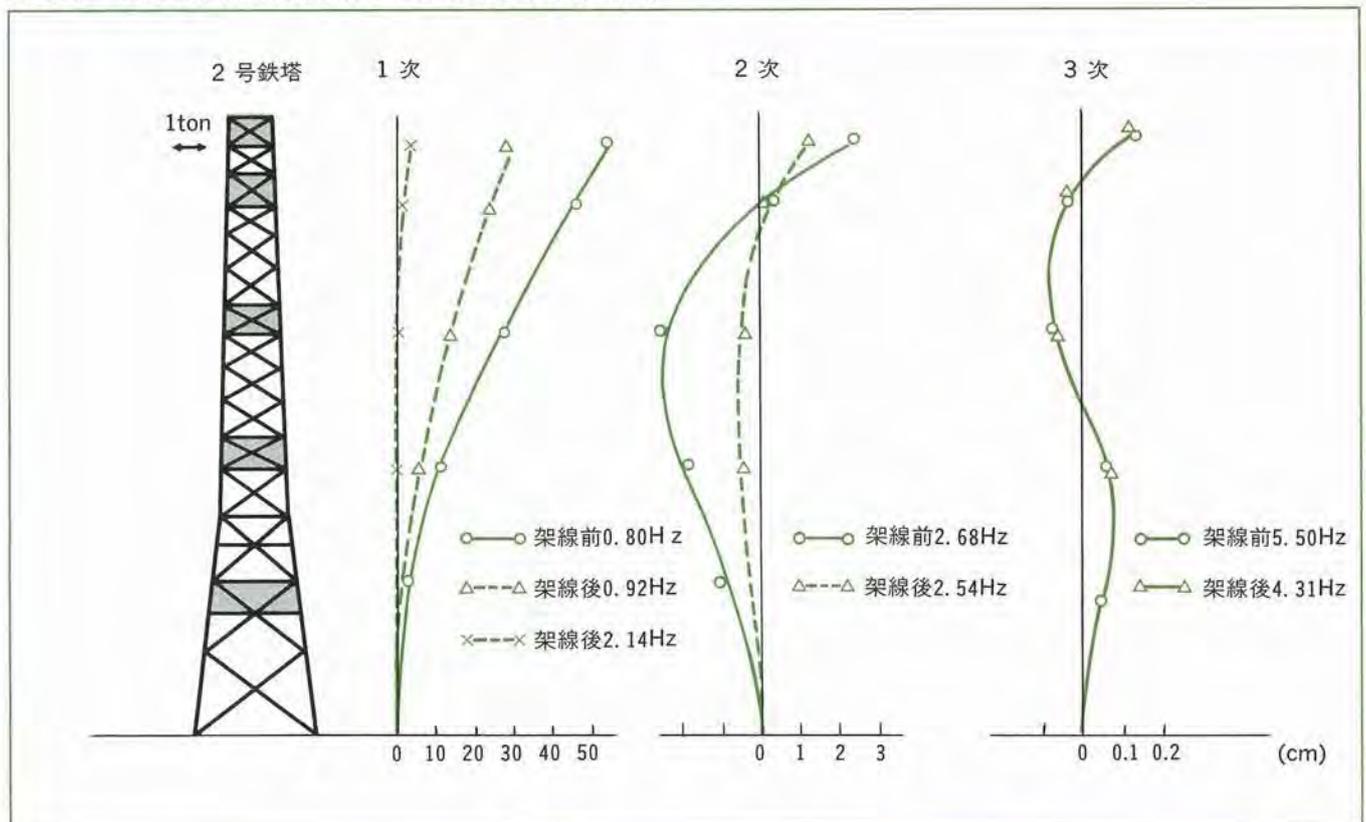
3. 架渉線が鉄塔の動的特性に及ぼす影響

架線後の2基2径間連成系となった場合の固有振動数と減衰定数を表2-4-2に単位正弦波入力による各次の共振変位応答を図2-4-6に併記した。

架線後では、3基の鉄塔と架渉線が連成する結果、架線前と異なる多くの固有振動数が存在し、振動モードも架線と異なるものが現われる。

また同一の大きさの正弦波起振力に対す

図2-4-6 単位(1ton)正弦波起振力による共振応答変位(線路方向)



る架線後の鉄塔変位、鉄塔部材応力は架線前と比べ小さくなる。

このほか架渉線の影響としては、振動方向によって異なり、鉄塔の固有振動数や振動モード、部材応力の分布等に与える影響は線路方向の方が大きい。

なお、減衰定数は架線後においても架線前と大差のない結果が得られている。

(坂本 雄吉)

### 2-4-3 数値解析による検討

#### 1. 数値モデル

基礎体は、その諸元と地盤の物性値が与えられれば、1質点3自由度(上下方向1自由度、水平方向2自由度)の振動系としてモデル化できる。しかし、「2-4-2」で述べたように、一般的には基礎固定と見なせるので、以下では基礎固定として解析を行った。

鉄塔のモデルとしては、立体骨組ならびに質中質量を持つ多数の梁の集合体として表わす等価ビームの2つを用いた。架渉線とがいし連は曲げ剛性の無視できる多数の直線要素に分割したモデルとした。

#### 2. 数値解析とモデルの評価

数値解析に用いるモデルは、1、3号鉄塔を等価ビーム、2号鉄塔を立体骨組とした。また、架渉線・がいし連については径間沿いに30分割したモデルを用いた。

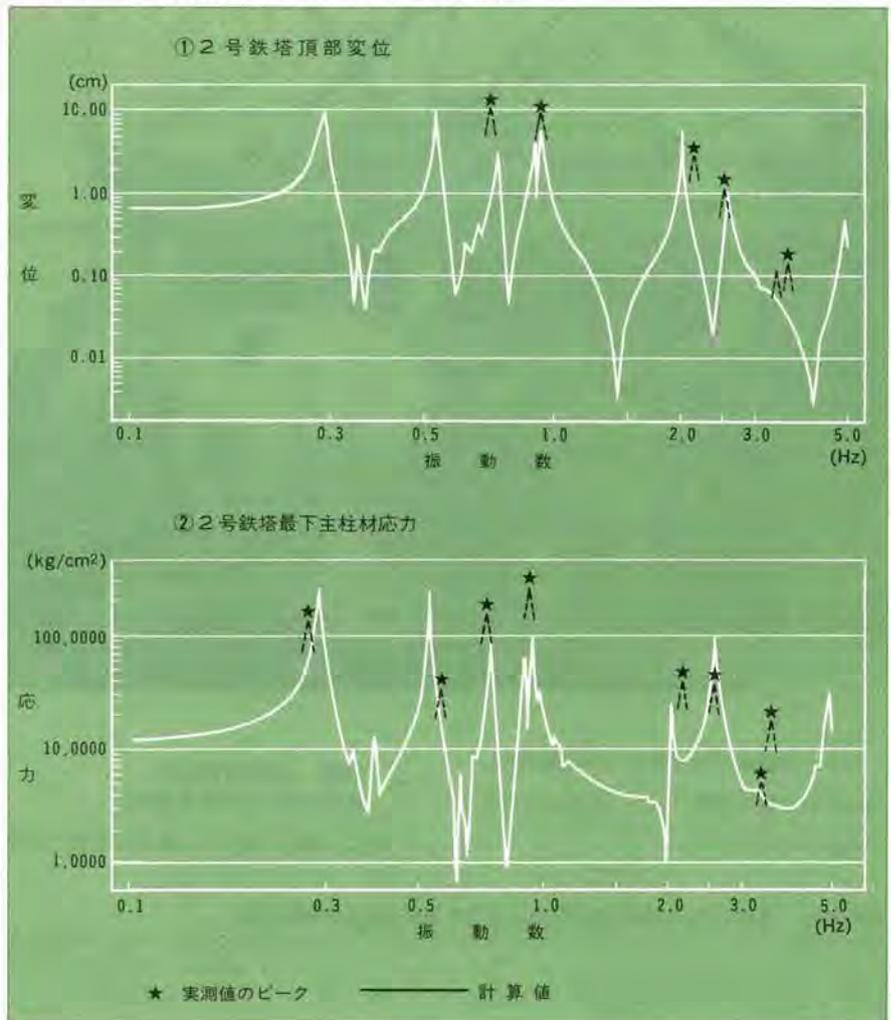
上記モデルによる鉄塔単体および鉄塔—架渉線連成系の固有振動数を計算した結果、表2-4-2に示したように試験値と良く一致している。

また図2-4-7に連成系モデルの2号鉄塔頂部変位と、最下節部材応力の定常応答に関する計算結果を、試験値と比較して示す。同図から、振動応答特性は、計算値と試験値がほぼ一致している。

以上のことから、立体骨組モデル、等価ビームモデルおよびこれらと架渉線・がいし連モデルを組み合わせた連成系モデルによる動的解析手法は、実用上十分な精度を有していると評価できる。

(坂本 雄吉)

図2-4-7 定常起振時の線路方向応答(起振力1 ton)



### 2-4-4 自然外力による応答の観測

「2-4-2」で述べた人工振動試験により、基礎、鉄塔、架渉線などから成る、3基2径間の連成系の振動特性(固有振動数、固有モード、減衰定数、伝達関数)が明らかにされ、これらに基づいて「2-4-3」で述べた送電線路の地震、強風などの外力に対する応答を求める数値モデルと解析手法が開発された。

この解析手法を検証し、さらに現行設計手法の妥当性の検証に資するため、赤城実規模試験線の各部にセンサを取り付けて、地震および強風に対する応答の待機観測を実施している。

観測開始以来、観測に値する大きさの地震や強風に遭遇していない(地上高10mに

おける10分間平均風速が15m/sec程度の風は経験されたが、自然風の特徴は風速によって異なるので、満足すべきものではない)。観測はなお継続されており、今後に期待されるが、ここでは観測の方法のみを略述しておく。

なお、強風については自然風の特徴(風速の高さ方向のプロフィール、時間的、空間的変動など)も貴重なデータとなることから、この観測も併せ行っている。

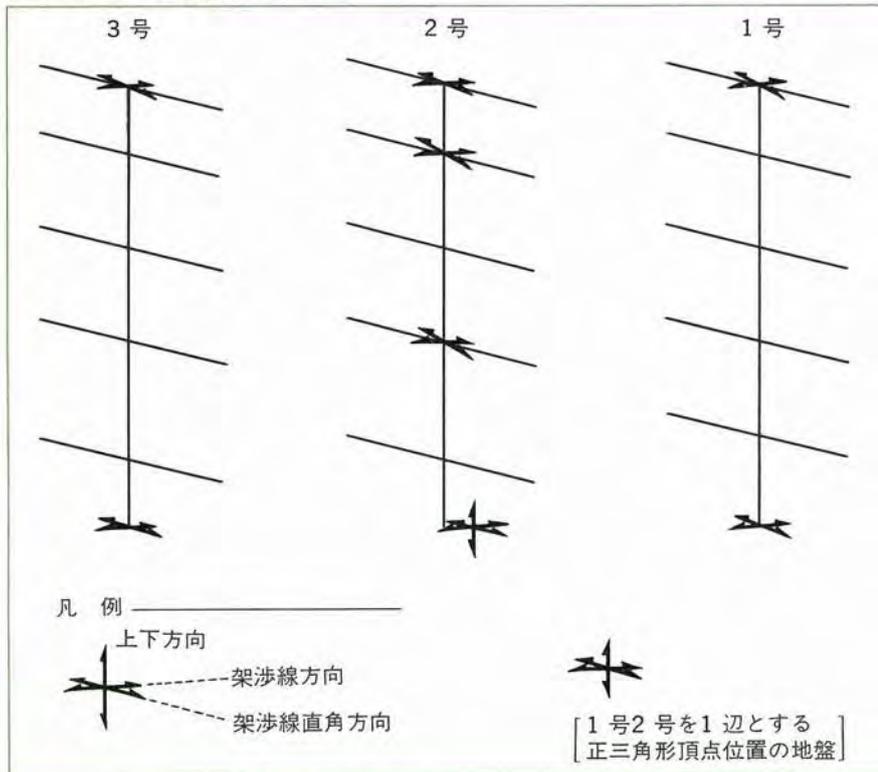
地震観測測点配置図を図2-4-8に、また、風応答観測測点配置図を図2-4-9に示す。

(坂本 雄吉)

### 2-4-5 UHV鉄塔の動的安定性

前項までに、赤城試験線でおこなわれた動的試験、これに基づいて作成された数値モ

図2-4-8 地震観測測点配置図



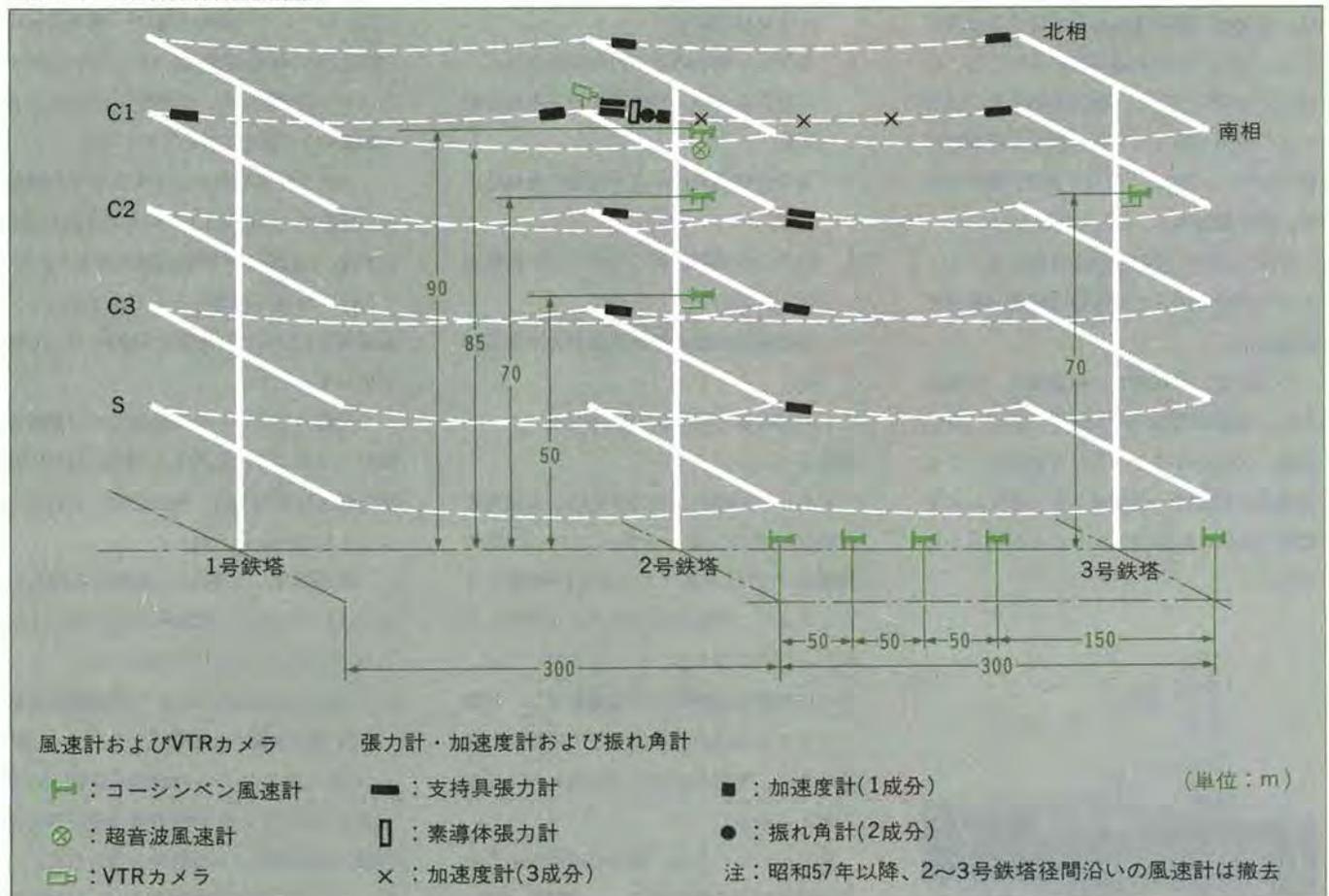
デル、またこれをさらに検証するために行われている自然外力(地震、強風)に対する鉄塔の応答の観測について述べた。

まだ大きな自然外力は観測されていないが、理論検討と動的試験の結果から、ここで開発された数値モデルはUHV級鉄塔の動的応答に使用できるものであることが検証されたものといえる。

しかし、前項までに述べられたところは、すべて赤城試験線を対象とし、赤城試験線はUHV線路の1例に過ぎないので、この結果をもって一般的にUHV線路全体の安定性を論ずることはできない。

そこで、ここで開発された数値モデルに基づいて、支持物の剛性、がいし吊型を修正し、径間長、径間数を変えての検討が線路部会で行われ、この結果として、地震、強風に対する応答が推定され、UHV線路は従来の設計法により、十分な安定性が得られることが明らかとされた。(坂本 雄吉)●

図2-4-9 風応答観測測点配置図



## 2-5 系統技術

担当●電力技術研究所 電力システム部 部長 町田 武彦

### 2-5-1 緒論と結論

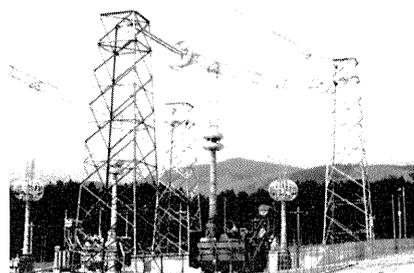
UHV 交流送電に関する研究のうち、本章においては、計画・運用に関する技術的諸問題すなわち、UHV 交流送電系統の基本系統特性および、UHV 交流送電に特有の系統技術問題とその解決策、今後の方向等について述べる。

#### I. 送電系統の基本系統特性

電力系統の計画をたてる場合には、基本潮流(系統の電圧・電力潮流分布、変圧器のタップ、調相容量など)、短絡電流、安定度、信頼性、経済性などを検討する必要がある。UHV 交流送電系統においても、これらの項目について、検討を加えた。当所ではその第一歩として昭和44年に基礎的な検討を行い、既に、「UHV 送電に関する考察」総合報告No.1、として報告した。

今回、UHV 送電特別委員会のもとで、モデル系統を用いた具体的な諸量の検討を実施した。

この結果、基本潮流、短絡電流、信頼性とも、現在開発中の技術を用いれば、特に問題となる点はなく、また安定度については系統の定態時、過渡時とも、予定した送電電力10GWが確保できることが明らかにされた。



また、経済性については、UHV 全系統コストの、約70%を送電線建設費が占めることが明らかとなり、電力輸送費の節減が、今後重要であることが判明した。

#### II. 特有の系統技術問題とその解決策

UHV 系統は既存の500kV系統に比べて、線路の充電容量(送電線と対地間の静電容量)が約5倍と格段に大きいため、これに起因する以下のような種々の問題、すなわち、

1. 発電機の遅れ力率運転確保問題
2. 線路充電時のフェランチ効果による電圧上昇抑制問題
3. 負荷しゃ断時の原子力発電所のスクラム防止および、短時間交流過電圧抑制問題
4. 常時逆相電流による発電機の過熱防止問題
5. 線路の両端開放時に発生する共振性過電圧抑制問題
6. 事故電流の零点推移現象が発生する問題
7. 高速度多相再閉路の確保問題が生じている。

これらの問題のうち大部分は、線路および母線に適切な量の分路リアクトル(零相補償付不平衡分路リアクトル)を接続することにより、対策のとれることが判明したが、上記の問題点3.、5.、7.については、さらに詳細な過渡解析の実施および、分路リアクトル以外の方策についての検討が必要であり、実用化に向けての残された課題と考えられる。

また6.については、発生の可能性も含めて詳細検討が必要である。(町田 武彦)

### 2-5-2 送電モデルと基本系統特性

UHV 交流送電モデルについては、将来の我が国の代表的な電力系統として、電源の遠隔化、大容量化を考慮に入れ、図2-5-1に示すような、里側外輸系統(400km)を含む600km、10GW送電の長距離大電力輸送形を想定した。

モデル系統を対象にして得られた主たる検討結果を以下に記す。

#### I. 基本潮流

検討の対象とした UHV 送電系統モデルは図2-5-1に示す通りであり、重負荷時に9,600MW、軽負荷時に6,400MWを送電するモデルを想定した。最高電圧は1,100kVと1,200kVの2通りについて検討した。

このモデル系統における UHV 系の線路充電容量は、最高電圧1,100kV系で約14,600MVA、1,200kV系で約17,200MVAである。

UHV 交流目標電圧として選定された、最高電圧1,100kVの系統の結果について以下に示す。

1. 分路リアクトルの補償量および配置を図2-5-2のように設定した結果、UHV 系統の電圧は重負荷時、軽負荷時ともほぼフラットな分布が得られた。
2. 変圧器タップ幅は、発電所の場合ほぼ、0.91P.U.前後、変電所の場合0.93~1.00P.U.で、ほぼ7%以内に納まった。
3. UHV 変電所における所要調相設備(UHV 側に接続される分路リアクトルは除く)が全て変圧器の3次巻線に接続されるものとすれば、3次巻線容量は変圧器定格容量の30%程度という結果が得られた。
4. UHV 系統の送電損失率は、UHV 系

図2-5-1 重負荷時の基本潮流モデル

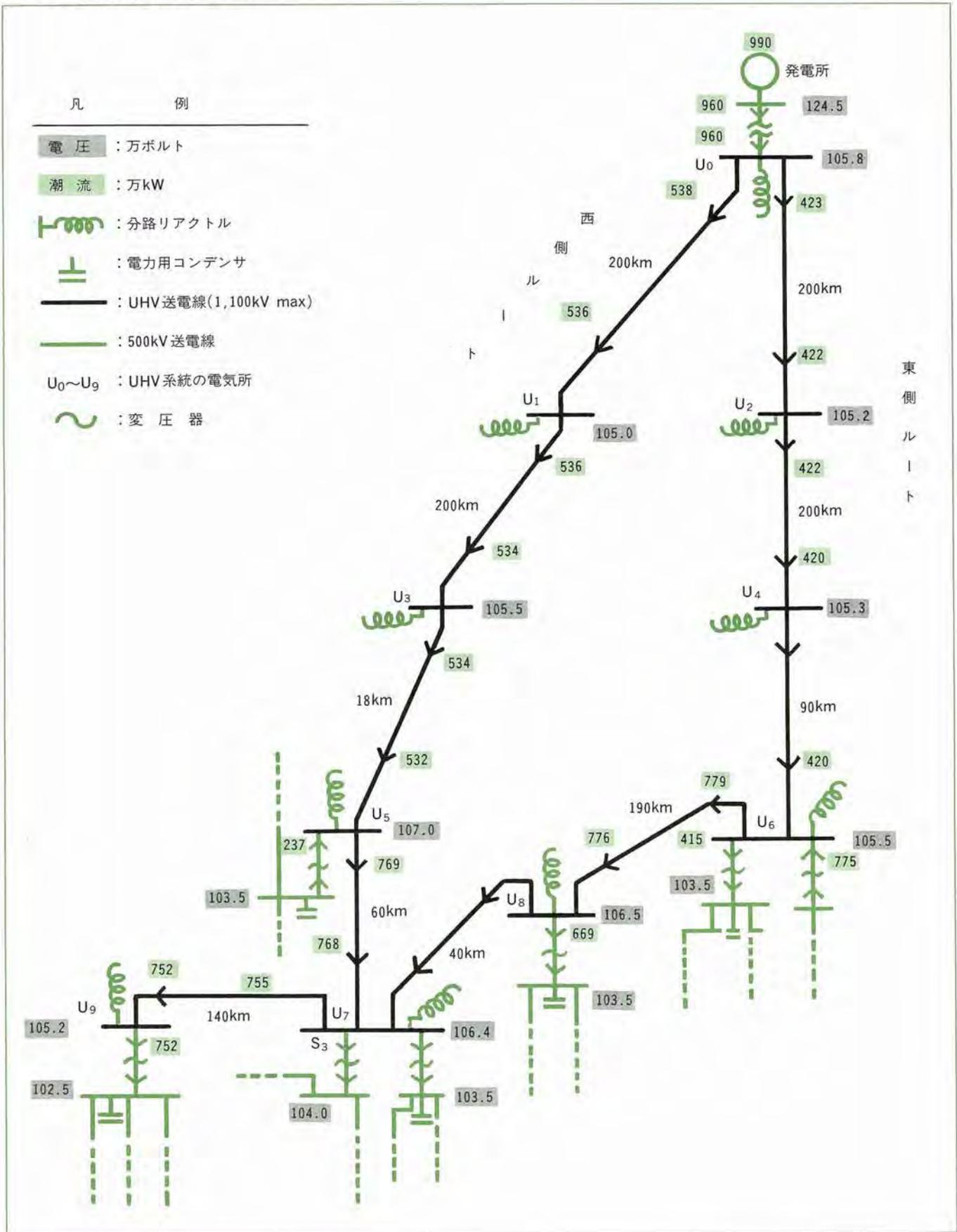


図2-5-2 UHV 系統における分路リアクトルの設置量と配置



表2-5-1 最高電圧とUHV系統の全送電損失

最高電圧	重負荷時	軽負荷時
1,100kV	1.0% (0.149GW)	0.6% (0.053GW)
1,200kV	0.7% (0.114GW)	0.5% (0.045GW)

注) %値：UHV系へ流入する電力の合計値をベースとする。  
重負荷時ベース：15.6GW 軽負荷時ベース：9.0GW

に流入する全電力値をベースとした場合、表2-5-1に示すように、重負荷時で約1%となる。

## II. 短絡電流

系統の短絡電流は、しゃ断器の容量や通信回線への誘導障害の程度を考慮して決定される。現在の基幹系統では短絡電流の許容値は50kAであり、UHV系統においても50kAがひとつの目安になるものと考えられる。

ここでは、最高電圧1,100kV、1,200kVの各電圧階級について短絡電流の計算を行った。検討の結果、UHV系統の最大短絡電流は1,100kVの外輪系統に現われ、約35kA

であり、特に問題のないことが明らかとなった。

## III. 電圧・無効電力

### 1. 所要無効電力補償量

「2-5-3」で述べる結果から、分路リアクトルの設置量、配置は以下の通りとなった。すなわち、電源送電線は全負荷しゃ断時に発生する、系統過電圧と原子炉スクラム防止の観点から、ほぼ100%補償とすることが必要である。

この場合、線路開放時の共振性異状電圧の抑制、および再閉路時間の確保のため、線路直付分路リアクトル(DShR)の補償量はほぼ60%程度となることなどを考慮した

結果、分路リアクトルの設置量と配置は、本系統モデルを用いた解析では図2-5-2の通りとなった。

### 2. 発電機遅れ力率運転の維持

発電機遅れ力率運転の維持は、系統の安定運用確保のための基本的条件である。無効電力の余剰が大きく、遅れ力率運転維持の面から厳しい条件にある軽負荷時について検討した結果、通常考えられる程度の軽負荷時の需給条件であれば、発電機遅れ力率運転のみのために必要な分路リアクトルによる補償度は45%程度でよいことが判明した。

一方1.項で前述したように、他の諸要因から決定される無効電力補償度は45%以上であるので、発電機の遅れ力率運転は十分維持できることが明らかとなった。

### 3. 線路充電時の適正電圧維持

電源送電線の西側ルート(U<sub>0</sub>~U<sub>5</sub>間)は発電所間がUHV系統で最も長く、580kmにもおよびため、線路充電時にフェランチ効果による電圧上昇を抑制する必要がある。

外輪系の電気所U<sub>5</sub>から充電を開始した場合の西側ルートのフェランチ効果による電圧上昇の分布を検討した結果、電源側母線U<sub>0</sub>に設置した分路リアクトルを線路充電時に線路側に接続しない場合でも、電圧上昇は最高電圧1,100kV以下に抑制できることが判明した。なお、分路リアクトルの設置量は図2-5-2に示す通りとし、U<sub>5</sub>の電圧は1.05P.U.とした。

また、亘長200km程度以下の送電線については、分路リアクトル無しでも最高電圧を越えることはないことが判明した。

## IV. 安定度

UHV送電線の系統設計の基本となる送電能力について、安定度面から検討を行った。

安定度は系統故障の有無により2つに区別され、故障の無い場合の安定度を定態安定度、故障が発生しても安定性を維持できる場合の安定度を過渡安定度と呼ぶ。また

発電機の制御系を考慮しない場合を固有安定度、考慮した場合を動的安定度と呼ぶ。過渡安定度は故障の種類(条件)によって異なる。

### 1. 定態安定度

600km、10GWの電力輸送に必要な送電線の電圧別ルート数、回線数は表2-5-2の通りであり、これを固有定態安定度計算により求めた。表2-5-2の条件で求めた固有および動的定態安定度計算結果の限界送電電力を表2-5-3に示す。

### 2. 過渡安定度

#### (i) 故障条件の設定

目標信頼度として、モデル系統の全巨長に対する雷害事故件数を年間に1回程度という厳しい条件で定めた結果、800kVでルート断、1,100kVおよび1,200kVは1線地路故障、1,500kVは故障なしという条件が得られた。

#### (ii) 過渡安定度計算結果

上記で設定された故障条件のもとで計算した結果を表2-5-3に示す。

### 3. 安定限界送電電力についての考察

UHV系統の送電能力について考察した結果は以下の通りである。

- (i) 今回想定したモデル系統においては、固有安定度が過渡安定度より厳しい。
- (ii) 固有定態安定限界送電電力は1,100kV系統で10GW、1,200kV系統で12GWとなる。
- (iii) 発電機制御系を考慮すると定態時における安定限界送電電力は4GW程度増加する。
- (iv) 2.(i)項で設定した故障条件下における過渡安定限界送電電力は1,100kV系統で14GW、1,200kV系統で16GWとなる。
- (v) 負荷の電圧特性、発電機端子の運転電圧などによって安定限界送電電力は1GW～2GW程度変化する可能性がある。
- (vi) 山側電源変圧器において2段昇圧方式を採用すると、安定限界送電電力は2GW程度減少する。
- (vii) 今回想定した系統モデルでは、発電機の脱調モードは里側500kV系統内の発電

表2-5-2 必要なルート数と回線数

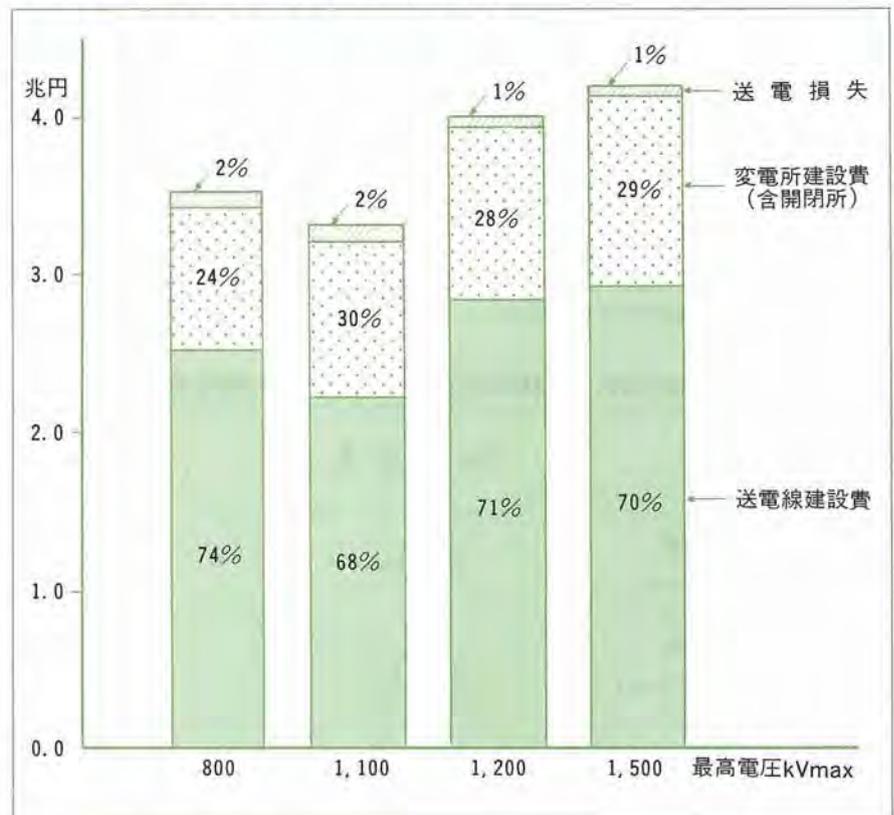
電 圧	800kV	1,100kV	1,200kV	1,500kV	(参考) 500kV
ル ー ト 数	2 回 線 4 ル ー ト	2 回 線 2 ル ー ト	2 回 線 2 ル ー ト	1 回 線 2 ル ー ト	2 回 線 7 ル ー ト

表2-5-3 安定限界送電電力

検討項目		最高電圧		参 考	
		1,100kV	1,200kV	800kV	1,500kV
定 態	固 有	10GW	12GW	9GW	11GW
	動 的	14GW	16GW	14GW	15GW
動的過渡	ル ー ト 断 2cct×(1LG-3LO)			14GW*	
	1 線 地 絡 (1LG-1LO)	14GW*	16GW*		

注) \* : 設定故障条件のもとで求めた安定限界送電電力  
□ : 制御系の効果を余裕と見なして無視し、実運用上のひとつの目安と考えた数値  
固有：発電機制御系の効果を考慮しない場合  
動的：発電機制御系の効果を考慮した場合

図2-5-3 総コストとそれに占める建設費等の割合



機間で発生し、これによって UHV 系統の安定限界送電電力が制約を受けた。里側500kV系統の構成によって UHV 系統の安定限界送電電力は変化すると考えられる。

## V. 経 済 性

UHV 全体の総コストは図2-5-3 に示すとおりであり、約3～4兆円となる。その約70%は送電線建設費である。(町田 武彦)

### 2-5-3 特有の系統技術問題とその解決策

UHV 系統は、送電線が、主として可聴ノイズ低減の面から多導体となるために、表2-5-4 に示すように、既存の500kV系統よりも格段に充電容量が大きく、さらに、送電線が2回線送電線となる場合は非燃架による影響もあって各相間のアンバランスや回線間の相互干渉が非常に大きくなる。

すなわち、UHV 送電特有の系統技術問題は、充電容量問題であると言っても過言ではない。

このため、基幹系統として本来具備すべき基本事項、たとえば、発電機の遅れ力率運転維持や運転電圧の最高電圧超過防止、負荷しゃ断時の原子力発電所スクラム防止と短時間交流過電圧の抑制、高速度多相再閉路の確保などが、在来の系統技術だけで、解決しうるかどうかという問題に直面している。

以上の如き重大な問題を、諸外国の先進技術も参考に、新たな観点に立って、幅広く検討した。その概要を図2-5-4 に示す。

また、その結果の主要点は以下に記す。

#### 1. 必要な充電容量補償量

電源送電系統の場合、系統の充電容量に対して必要な補償度を定める支配的要因は、通常の系統操作によって生ずる過電圧の抑制の問題ではなく、送電線ルート断による負荷しゃ断時の問題であり、相当量の分路リアクトルを系統に配置して充電容量をほぼ100%補償することが必要である。

この充電容量補償は、線路側 UHV 分路リアクトルによる適当量(正相分で60%程度)の補償と、電気母線などに設置する分路リアクトルによる補償とを合せて、行う必要がある。

#### 2. 再閉路技術

系統系の骨格をなす UHV 系統においては、ルート断事故を出来る限り防止することが極めて重要であり、そのためには、500kV系統と同様に、高速度多相再閉路を採用することが必要となる。

ところが、二次アークを消弧するための対策を施さないと、500kV系統なみの高速度多相再閉路が困難となることが考えられる。これに対し、零相補償付不平衡分路リアクトルあるいは高速自動接地方式を適用することを検討した結果、いずれの方式によっても、二次アークの消弧時間を有効に短縮しうることがわかった。

#### 3. 燃架の要否

UHV 送電線の燃架の要否について検討した結果、燃架を実施する必要はないものと考えられる。

#### 1. 負荷しゃ断時の原子力発電所スクラム防止と短時間交流過電圧の抑制

##### 1. 原子力発電所のスクラム防止

原子力発電所には、負荷そう失事故時に発電機回転数が上昇して原子炉がスクラム(一旦スクラムすると定格出力に戻るまでに100時間程度を要す)に致ることのないように、パワーロードアンバランスリレー(PLURY)が設置されている。PLURYは誤動作防止の観点から電流検出方式が用いられる。

ところが UHV 電源送電系統の充電容量の補償度が低いと、負荷しゃ断が発生しても線路充電電流が流れつづけるため PLURY が動作せず、タービンへ流入する蒸気がカットされないため発電機回転数が上昇するという問題がある。

このため線路無負荷時の無効電圧バランスを考慮し、補償度は少なくとも90%以上とする必要がある。また補償度を90%以上としても、負荷しゃ断後電流は直ちに零とならず、PLURY の動作条件に満たない場合もあるので今後詳細な検討が必要である。

##### 2. 系統の交流過電圧抑制

###### (i) 基本的な考え方

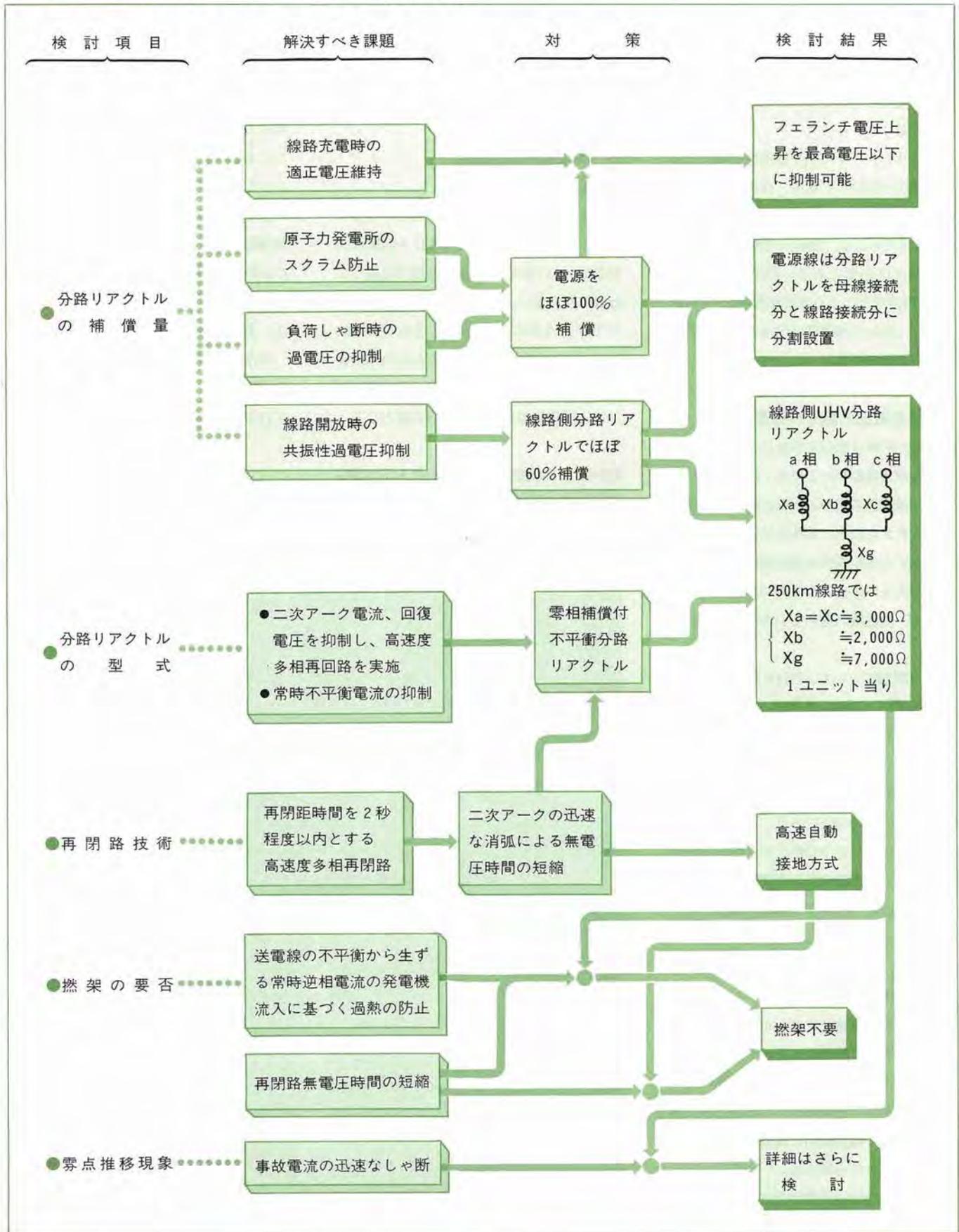
電源送電系統の里側において事故などにより線路が2回線とも開放されると、主として線路に発生する無効電力の影響により、UHV 系統の電圧が上昇し、過電圧が発生する。この過電圧は、サージ性電圧とは異なり、商用周波数領域での過電圧であるため、高い電圧が長時間継続すると酸化亜鉛

表2-5-4 UHV送電線と500kV送電線との充電容量および各相充電容量アンバランスの比較

(2回線、100kmあたり)

	充 電 容 量	各相充電容量の差 [a相(あるいはc相)とb相との差]	
UHV送電線 (ACSR810mm <sup>2</sup> ×4)	974MVA	8.6MVA	a ●      ● c' b ●      ● b' c ●      ● a'
500kV送電線 (TACSR810mm <sup>2</sup> ×4)	216MVA	1.1MVA	
備 考	UHVは500kVの約5倍	UHVは500kVの約8倍	

図2-5-4 UHV 送電特有の系統技術問題検討経過および結果の概要



型避雷器を熱的に破壊するおそれがある。

この過電圧を抑制するためには、線路の充電容量を分路リアクトル(ShR)で補償することが基本となる。

### (iii) 過電圧抑制に必要な分路リアクトル設置量

分路リアクトル(ShR)補償度と電圧上昇との関係を検討した結果、保護リレーにより発電機をトリップし、過電圧を短時間に除去するためには、ShRの補償度は少なくとも95%は必要であり、ShRの一部停止(定期点検などにより5%程度停止)も考慮すると、ShRの補償度はほぼ100%とすることが必要である。

## II. 逆相電流と燃架の要否

UHV系統は500kV系統に比べて高電圧、多導体の送電線であるため、燃架をしない場合、送電線各相の不均衡が量的に問題になると考えられる。具体的には不均衡によって生ずる逆相電流が発電機を流れるため、それが大きい場合、発電機の逆相電流耐量を超え、発電機の過熱を引き起こす懸念がある。

この問題について、UHV外輸系統モデルを対象に、系統の逆相電流の検討を行った。この結果、UHV系統の不均衡の影響を最も強く受けると考えられるUHV系統の近傍の発電機において、逆相電流は定格正相電流の1.4%以下であり、逆相電流耐量(同5%)に比べて十分小さい。従って逆相電流による発電機過熱の問題は生じないと考えられ、この面から送電線を燃架する必要はないものと考えられる。

## III. 分路リアクトル補償時の共振性異常電圧

充電容量を分路リアクトルで補償するため、これを全て線路側に接続すると、その補償度によっては線路開放時に線路の対地キャパシタンスと分路リアクトルとが共振状態となり、開放線路に異常に高い回復電圧を発生することがある。

このような共振状態が発生すると二次アーークの再発弧を誘発し、再閉路が極めて困

難となることが考えられる。

これを防止するためには、分路リアクトルの構成や正相補償度について検討する必要がある、その具体的方策は「V」で述べることとする。

## IV. 高速度多相再閉路

### 1. 必要性

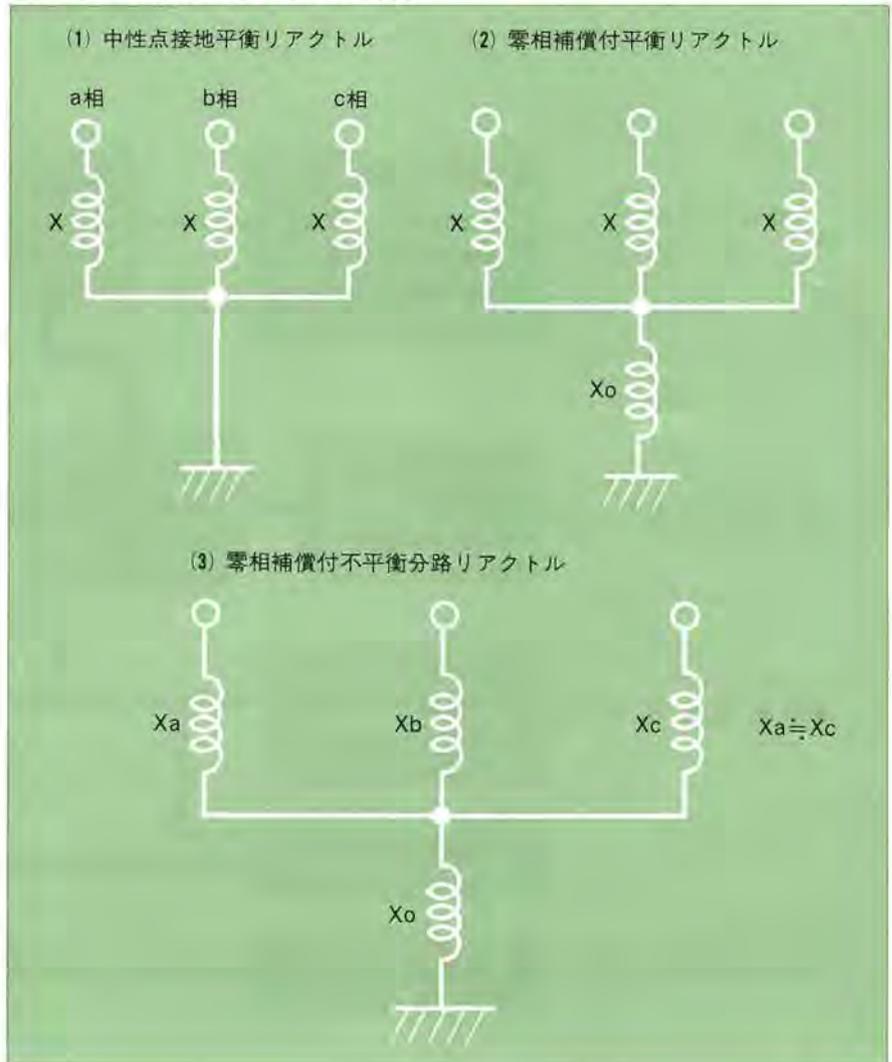
UHV系統は将来の系統連系の中核をなすものであり、ルート断事故(2回線永久事故)は、いかなる場合にも極力回避しなければならない。ルート断事故の発生確率を下げるためには、2回線にまたがる事故であっても、2相が健全であれば再閉路実施が可能である、多相再閉路方式を500kV系統と同様に採用することが必要となる。

ちなみに、UHV外輸系統におけるルート断発生の可能性を推定してみると、多相再閉路方式を採用すれば1500年に1回程度(2回線同相事故発生確率×再閉路不成功率)となるが、多相再閉路を用いないと70年に1回程度と発生確率はかなり高くなってしまい、正常な系統運用の許容限度を超えることとなる。また雷多発時などのように事故が続発することが予想される場合は、系統運用上、一刻も早く事故相を復旧することが必要になると考えられ、この意味からも高速度多相再閉路が必要となる。

### 2. 再閉路時間

多相再閉路方式を採用すると、非対称事故が発生し、しゃ断が完了した後、再閉路されるまでの間、系統はアンバランスな状

図2-5-5 線路直付分路リアクトルの構成



態になっているため、零相および逆相電流が流れる。零相および逆相電流が継続して流れると系統の最終保護となる3段あるいは4段のバックアップリレーが動作してしまうので、これらのリレーの整定時間は再閉路時間と協調をとる必要がある。

再閉路時間が長いと、バックアップリレーの整定時間も長くなり、発電機の軸ねじれ、固定子コイルやロータの過熱などの問題が生ずる。

所要再閉路時間については、今後詳細な検討をしなければならないが、後備保護リレーの整定時間と系統運用上から1秒程度とすることが望ましく、最悪の場合でも2秒程度以内とする必要があると考えられる。

## V. 零相補償付分路リアクトルによる二次アーク電流・回復電圧の抑制

### 1. 分路リアクトルの構成

検討の対象とした分路リアクトルの構成は図2-5-5の通りである。

検討の結果、中性点接地平衡リアクトルや零相補償付平衡リアクトルでは、回復電圧や二次アーク電流を抑制して再閉路無電圧時間を2秒以内に短縮することが困難であることが明らかとなった。

UHV系統の高速度多相再閉路実現のためには、その再閉路時間の一応の目安である2秒以内を達成する必要がある。このため送電線の非燃架にもとづく線路定数の不平衡性を解消することを主眼として、零相補償付不平衡分路リアクトルに的をしぼり、再閉路無電圧時間を最短とするようリアクトルの諸元を求めた。

めには、その再閉路時間の一応の目安である2秒以内を達成する必要がある。このため送電線の非燃架にもとづく線路定数の不平衡性を解消することを主眼として、零相補償付不平衡分路リアクトルに的をしぼり、再閉路無電圧時間を最短とするようリアクトルの諸元を求めた。

### 2. 零相補償付不平衡分路リアクトルの容量選定

分路リアクトルの不平衡度 $X_a/X_b$ (図2-5-5(3)参照)、補償度および零相部分のインピーダンス値 $X_o$ を検討した。

この結果、 $X_a/X_b$ 比はほぼ1.5~1.8が適当であることが判明した。

また $X_a/X_b$ を1.5に固定し、 $X_o/X_a$ をパラメータとして、「分路リアクトルの補償度」対「再閉路無電圧時間(平均値)」の関係を求め、これより、分路リアクトルの補償度は約60~70%、 $X_o/X_a$ 比はほぼ2.0~2.4が適当であることが明らかとなった。

以上の結果を要約すると表2-5-5の通りである。

## VI. 高速自動接地方式

UHV系統において、不可欠な高速度多相再閉路の実現のためには、二次アークをすみやかに消弧することが必要であり、こ

れを達成する技術として、零相補償付不平衡分路リアクトル方式の他に高速自動接地方式が考えられる。

この方式は、事故しゃ断後開放された事故相両端を高速自動接地装置により接地することにより二次アークを消弧し、その後すみやかに高速自動接地装置を開路し再閉路するものである。

この高速自動接地方式は、各相ごとに事故検出、しゃ断器操作を実施している高速度多相再閉路方式と同レベルの技術と考えられ、十分信頼性の高いシステムを構成することが可能であると考えられる。

検討の結果、本方式は二次アークの消弧が外的要因(風速、風向等)によらず確実であること、事故様相にかかわらず高速度多相再閉路が可能であること、系統の電圧維持や負荷しゃ断時の対策の面から分路リアクトルを必ずしも必要としない系統では、分路リアクトルに比べて経済的であることなどが明らかとなった。

## VII. 零点推移現象

送電線で、地絡、短絡事故が発生した場合、そのタイミングによっては故障電流が数サイクルの間、零点を切らず、このためしゃ断器で電流をしゃ断できない場合があり得る。

これを零点推移(またはゼロミス)現象と呼んでいる。これは主として、故障前後の電流位相差が大きい場合に発生し易く、充電容量の大きいUHV系統ではその条件にあてはまると考えられている。

また、分路リアクトルで補償した場合にはこれが発生しにくくなることが計算により確かめられている。

零点推移が一番発生しやすいのは、二相短絡事故であるが現実の系統では、架空地線の存在や相分離母線の採用のため地路が伴い易く、地路事故では零相回路の過渡直流分の減衰が早いので、零点推移が発生しにくいと考えられている。詳細についてはさらに検討を要すると思われる。

(町田 武彦)●

表2-5-5 UHV線路側に設置する分路リアクトルの諸元 (50Hz)

項	目	数 値
結 果	不 平 衡 度 $(\frac{X_a}{X_b})$	1.5~1.8
	補 償 度	60~70%
	零相部分のリアクトル値 ( $X_o/X_a$ で表示)	2.0~2.4
巨長250km の 場 合	ユ ニ ッ ト 容 量 (3相)	350~400MVA
	リ ア ク タ ン ス	$X_a = X_c =$
		2,900~3,200オーム
		$X_b =$
		1,900~2,200オーム
		$X_o =$
		6,200~7,200オーム

## 2-6 実証試験

担当●電力技術研究所 特任研究員 坂本 雄吉

### 2-6-1 緒論と結論

我が国は、国土が狭隘で、送電線路のルートを得ることが困難であるため、UHV線路であっても、2回線鉄塔を使用する必要があると予想されるのに対して、海外の1,000kV級線路では、ほとんどが1回線鉄塔を使用することを予想しており、また気象条件も異なるところから、UHV送電特別委員会で作られた概念設計によるUHV実規模線路のプロトタイプを建設し、下記の諸課題を検証することとなった。

1. UHV送電線の地震・強風に対する安定性

2. UHV送電線の環境対策

3. 建設技術、保守技術

以上の諸課題の検証が本節に述べる実証試験の目的である。

これらのうち、機械的安定性の検証については、「2-4 機械力」で述べた。また建設技術に関しては、試験送電線建設時に電力会社および関連工事会社で検討されてきた、種々のUHV級大型鉄塔の基礎施工、上部組み立て、および10導体架線工法が試みられ、各々成果を挙げたが、本稿では割愛することとし、主に環境対策に関する試験設備の概要、実証試験の進め方について以下に述べることにする。

要約すると、実証試験の目的は、これまでの内外の研究成果を踏まえて得られた概念設計が所期の機械的、電気的性能を示すことを詳細に検討し、公共的環境に悪影響を与えないUHV送電線の設計技術を、確立することにある。

また、その後の検討により特に支持点高低差のある個所において、上相のプレハブ・ジャンパと下相がいし連の遮蔽環との間の、相間開閉サージに対する対電圧が、鉄塔のアーム間の垂直距離をきめるパラメータとなることが判明した。

このような電極形状の相間開閉サージに対するフラッシュオーバー特性は、国際的にも

表2-6-1 実規模試験線概要

項目	仕様	備考
最高電圧	AC 1,100kV	
亘長、径間数	約0.6km 2径間	鉄塔動的試験、環境試験において実線路との等価性を得るため、1径間長300m 2径間とする。
配置	東西方向	鉄塔動的試験、風騒音測定的面から風向と交差するルートをとる。
装柱	AC 2回線垂直逆相配列 水平線間 32m	鉄塔動的安定性および環境対策面で苛酷となる2回線装柱とする。
鉄塔型基数	直線型耐張鉄塔 (中間1基) 引留型鉄塔 (端部2基)	鉄塔動的試験を代表的な型で行なうため、中間1基は耐張型とする。
導体方式	ACSR 810mm <sup>2</sup> ×10 (素導体間隔40cm、導体束直径約1.3m)	コロナ騒音対策を実測検証するため、強雨時50~55dB(A)、軽雨時40~45dB(A)の設計とする。地表電界強度45V/cm (30V/cm×1.5)程度の電線地上高とする。
架空地線	ACSR 810mm <sup>2</sup> ×1 (2条)	コロナ対策および誘導電流対策面から実用的な線種とする。
しゃへい線	アルミ覆鋼より線 100mm <sup>2</sup> 3条/回線×2	しゃへい線の取付・外しにより、電界強度の変化を可能とする。
がいし装置	4連耐張装置 (42tonおよび54tonがいし)	コロナ雑音特性等が500kV送電線と同等以上の実用的ながいし装置とする。
鉄塔基礎	現場施工鉄筋コンクリート杭-逆T字型 基礎 (2号および1、3号鉄塔引揚側) 逆T字型基礎 (1、3号鉄塔圧縮側)	現地条件に適した代表的な基礎型とする。

得られていないところから、これを実証的に研究するため、UHV 塩原実験場構内に、既設開閉インパルス発生装置と組み合わせて、目的を達し得る実験設備を新設した。

この設備についても「2-6-6」で述べることとした。 (坂本 雄吉)

## 2-6-2 赤城試験送電線

UHV 赤城試験送電線の概要および構成を表2-6-1、および図2-6-1に示す。

すなわち、

### 1. 電圧

公称1,000kV、最大1,000kVである。なお、後述するように課電設備は対地800kVまで印加できるものを備えており、単相課電の場合においても、電線の表面電位傾度を十分高くし、コロナケージ(単相)と試験線単相の比較、試験線での単相と3相の比較試験ができるようにしてある。

### 2. 亘長

計600m、300m×2径である。これは、用地上の制約から実線路に予想されるものよ

りやや短い、動的試験ならびに障害対策試験には支障がないものと考えられる。

### 3. 配置

試験線の走行は東西である。これは、現地での従来からの気象観測データを調べたところ、強風は赤城おろし、すなわち北風であるので、これと直角に選定したものである。

### 4. 装柱

2回線垂直逆相配列。これは、実用性の面で考えられる代表的な装柱のなかから、動的試験において、苛酷側の実証をおこなうためである。

### 5. 鉄塔

2回線垂直配列の鉄塔3基を備えている。2号鉄塔および基礎を図2-6-2に示す。

これらの鉄塔は、主として中空鋼管を使用し、1号鉄塔の下部のみに耐候性鋼材(裸材、1部錆安定化処理)を試用した。これは安定錆ができることにより亜鉛メッキ、塗装が必要でなくなる鋼材で、保守の簡易化ができ、安定錆の色が山地の景観にマッチするところから、今後の採用が期待で

きるものである。

また、この鋼材の安定錆生成状況を調べるため、付近にサンプルの曝露スタンドを設け、20年間にわたる曝露をおこなっている。サンプリングは1年、3年、5年、10年、15年および20年目に行う計画で、既に1年目のサンプリングを終り腐食量などのデータをまとめつつある。

1号鉄塔は高さ93m、重量は約400ton、引留型で、2回線に逆相配列で電圧を印加できるような特殊の装柱を有している。

また、下部の支柱材の2ヶ所(4脚計8ヶ所)で現場溶接を試みた。

これは鋼材輸送の面から、単材の重量を3ton程度に抑えることが望ましいのに対して、鉄塔が巨大になると支柱材下部では単位長あたりの重量が大きくなり、多くのフランジが必要となりコストも増してしまう。この対策として現場溶接が考えられるところから試みられたもので、良好な結果が得られた。

2号鉄塔は高さ97m、直線耐張型で、V吊り懸垂に改造可能、重量は約300tonであ

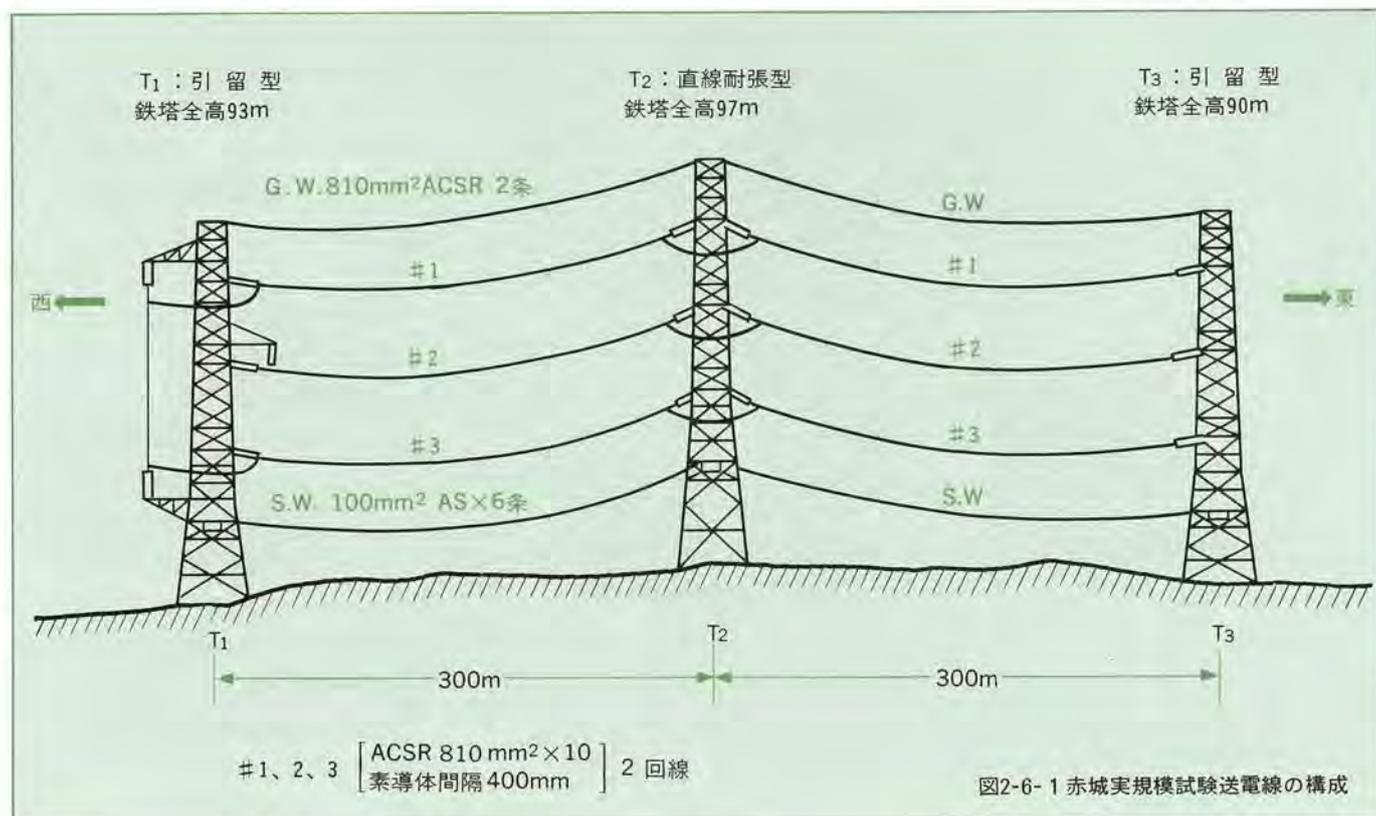
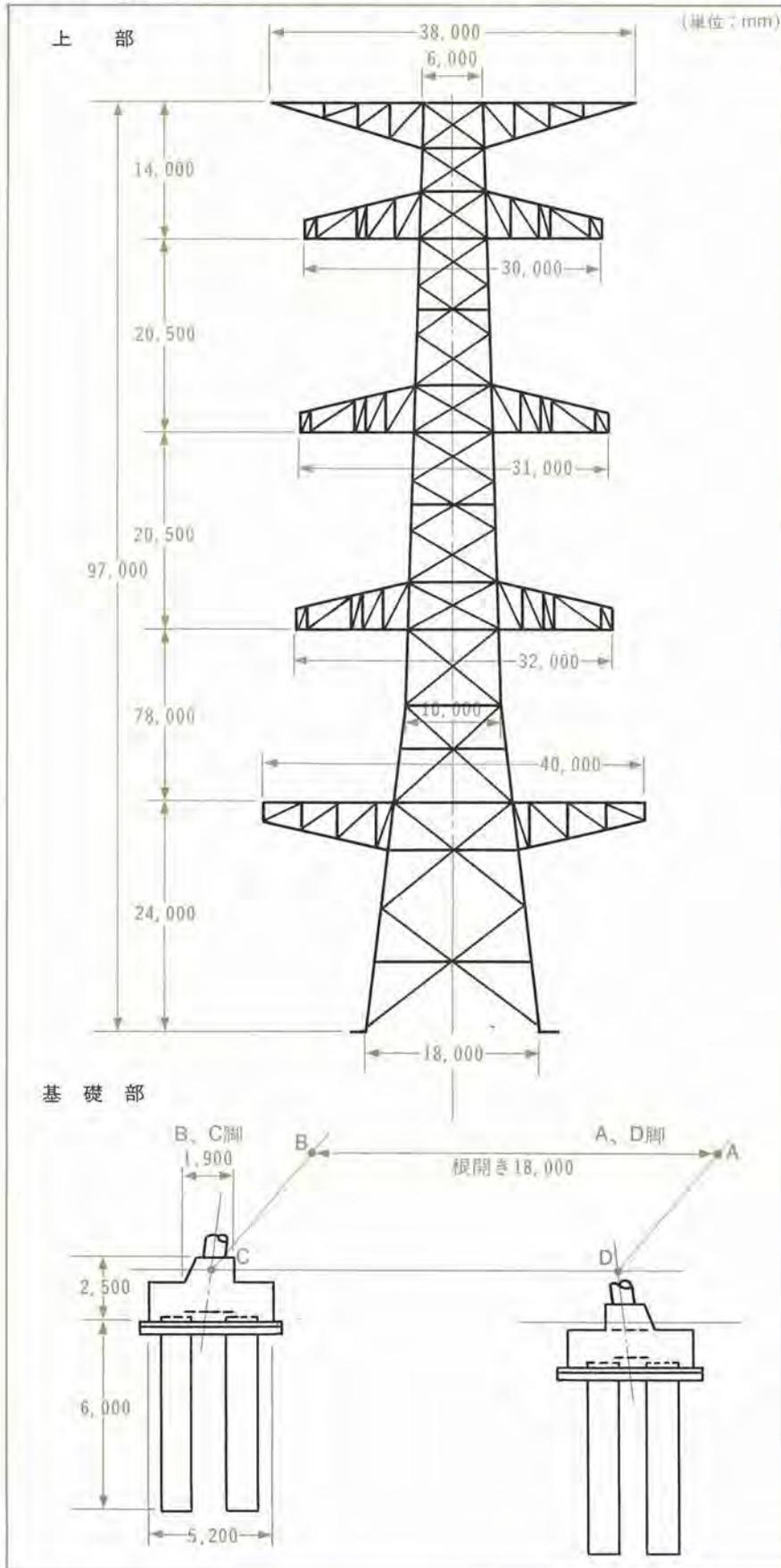


図2-6-2 UHV 赤城実規模試験線 2号鉄塔の形状・寸法



る。

この鉄塔はクライミング・クレーンを試用して組み立てられたため、それに適した構造を有しており、また後述する加振機を使用した動的試験の対象としたので、各アームに足場を設け、測定用センサの調整に便利ようになっている。

また、現地は襲雷頻度が高いので、雷撃によるデータを得るため、特に架空地線アームの上にSPがいしを立て、その上に雷捕捉用のアームを設け、シャントを入れて、その電圧出力を光ファイバーで測定室に導いて計測する配慮を加えている。

3号鉄塔は、高さ90mの引留型で、重量は約400ton、付近に干本桜と呼ばれる桜の名所があるので観桜客に不快感を与えない色を大阪芸大の近藤助教授に選択願い、下部のみオリーブ・シェード(5 Y-3・712)に塗装している。

鉄塔の設計はすべて電気学会標準「送電用支持物設計標準」(JEC-127, 1979)に従ったが、現地は風荷重が高温季、低温季ともに最小地域に該当するので、これに基づいて計算した。

#### 1. 導体方式

現在は環境調和(サンド・ブラストによりつや消し)ACSR810mm<sup>2</sup>×10導体を、低温季強風時の最大使用張力が50tonになるように架線している。素導体間隔は40cm、導体束直径は約1.3mである。

このサンド・ブラストしたつや消しACSRを使用したのは、周囲景観との調和をはかるためであるが、親水性も増すので、コロナ特性の向上も期待できる。

また、風騒音とコロナ騒音などの特性を比較するため、1～2号径間はそのままとし、2～3号径間には、複巻きの風騒音防止用スパイラルロッドを取りつけた。

この10導体は2～3号径間のみを近いうちに8導体に架線変更して特性の比較をおこなう予定である。

また、2号鉄塔の耐張がいし連には、すべて吊架式プレハブ・ジャンパを用い、鉄塔アームの垂直間隔の低減をはかっている。

(図2-6-3 参照)

### 2. 架空地線

架空地線には電力線と同一の環境調和 ACSR810mm<sup>2</sup> 2条を用いている。UHV 級となると静電界が大きいため架空地線からコロナが発生する恐れがあり、この面から検討を加えてサイズを定めている。

### 3. シャへい線

電力線の下部に、環境調和アルミ覆鋼燃線100mm<sup>2</sup>のシャへい線6条を、架設しているが、10条まで架設できるようにしてある。これは、電力線直下の静電誘導を低減し、鉄塔高を極力低くするためである。なお試験線では、これを6条設けたとき電線の最低点における静電界が45V/cm、10条設けたとき30V/cmとなるように、下線の地上高を26mに定めている。

またシャへい線の接地を外して、大地から絶縁し地表静電界を調節できるように、懸垂がいしで引留めている。

### 4. がいし装置

がいしは、北回線下相のみに強度54tonの懸垂がいし32ヶ、水平4連が、他の5相には強度42tonの懸垂がいし38ヶ、水平4連が使用されている。これは単相課電により両者のコロナ特性の差が検討できるようにしたものである。

架線金具は、がいしの強度に合わせて設計され、鉄塔側は2点支持である。がいし連のシャへい環は、電線のみでのコロナ障害を測定し得るようにがいし連からのコロナを抑制するように設計した大きなもの(図2-6-4 参照)と、実用の予想されるものの両方を備えつけ、随時交換して試験を進めることとしている。

### 5. 鉄塔基礎

基礎は、種々のタイプが検討されたが、経済面から現地に優れたベント工法による現場施工鉄筋コンクリート杭と、逆T字型基礎を組み合わせたものが2号、および1、3号の引揚脚に、また逆T字型基礎が1、3号の圧縮脚に使用されている。

(坂本 雄吉)

図2-6-3 吊架式プレハブ・ジャンパ

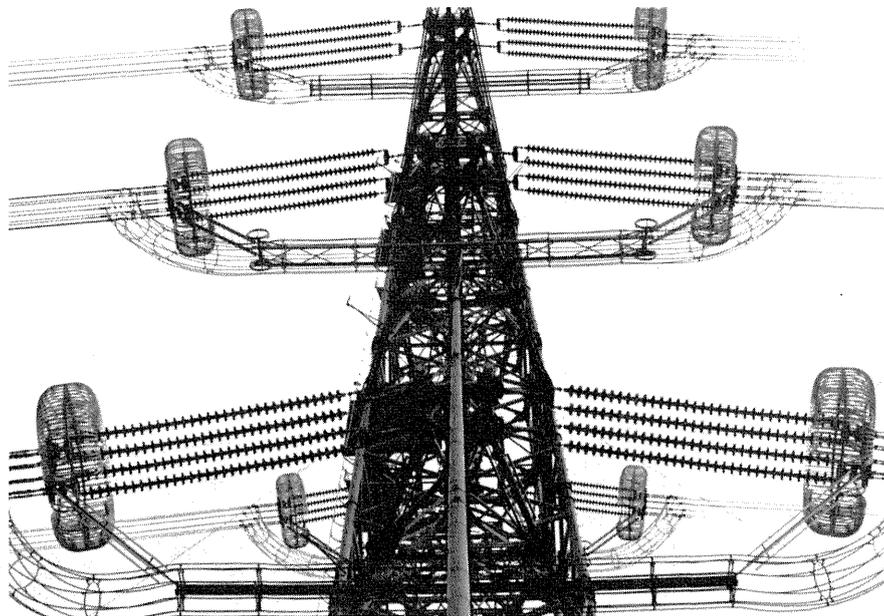
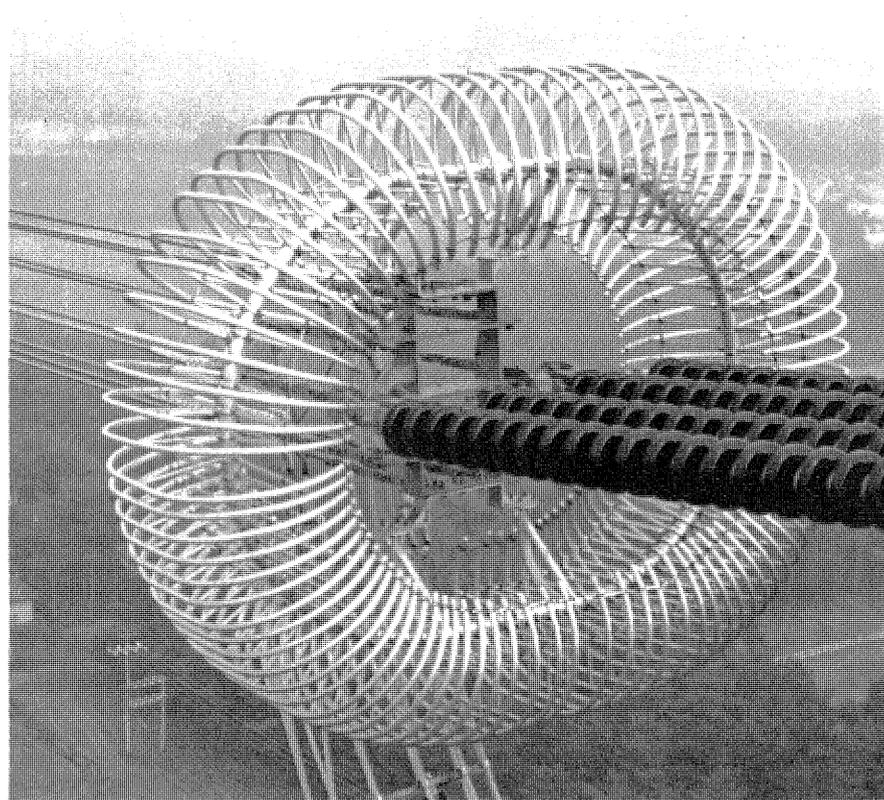


図2-6-4 がいし連のシャへい環(コロナフリー・シールドリング)



## 2-6-3 課電設備

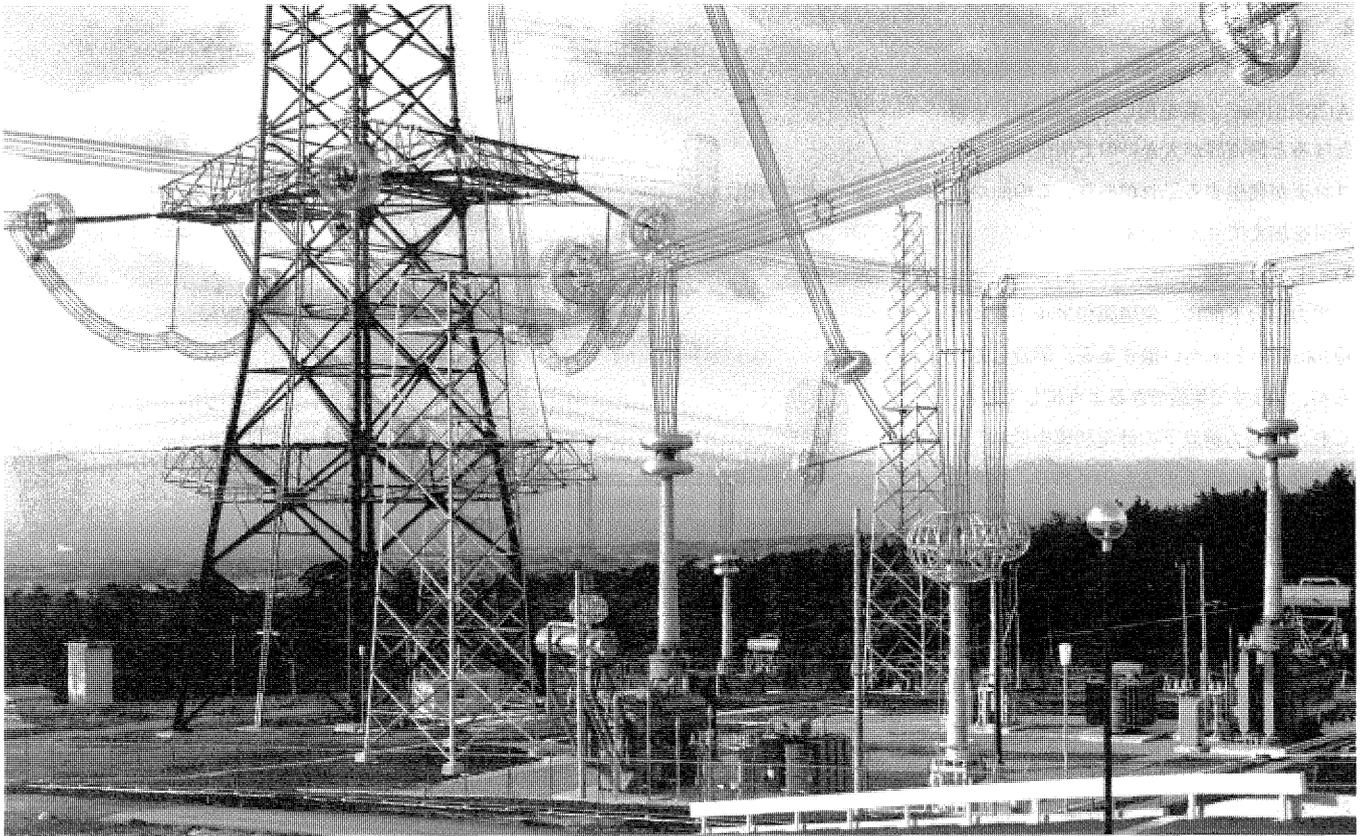
本試験線に電圧を印加するため、1号鉄塔の周辺に課電設備を設置した。

赤城試験センターは、66kVで東京電力から受電しているが、この受電変電所に66/

22kV、3,000kVA 受電変圧器を新設し、22kVに降圧し、CV ケーブル60mm<sup>2</sup> 3相1.1kmにより設備ヤードに導いている。なお、ケーブルの両端には、シャ断器などを内蔵したキュービクルが設置されている。

この電圧は、受電側キュービクルに隣接

図2-6-5 課電設備全景



して設置された負荷時タップ切換装置つき変圧器(LRTr)で任意の電圧に変換され、架空母線によって各相の試験用変圧器(TTr)に導びかれ、UHV級電圧に昇圧される。

この発生電圧は、電圧測定用分圧器(PD)で測定され、電圧制御装置によって、LRTrのタップ切換装置と結合され、フィード・バック制御によって所期の電圧に保持される。また線路のキャパシタンスを補償するために、各試験用変圧器に隣接して補償リアクトルを設けている。

試験線を单相課電するのに便利のように、22kV母線には断路器を設けている。課電設備の全景を図2-6-5に示す。

主要機器・設備の定格は、下記の通りである。

1. 試験用変圧器(TTr)

電 圧：25 / 900kV(対地)

容 量：6,000kVA

相数、台数：単相、3台

内部部分放電検出装置内蔵、ブッシング

CT、ブッシングPT内蔵

2. 負荷時タップ切換変圧器(LRTr)

電 圧：22 / 0~25kV

容 量：3,000kVA

切換タップ数：粗タップ11、各々に密タップ21

相 数、台 数：3相、1台

3. UHV側電圧側定用分圧器(PD)

電 圧：800kV

静電容量：700PF

台 数：3台

4. 補償リアクトル

電 圧：22kV

容 量：6,000kVA

タップ数：6

相数、台数：単相、3台

5. UHV母線他

試験用変圧器で発生した電圧を試験線の両回線に逆相配列で印加できるように、自立鉄塔5基を設けて母線を架設した。

母線側のノイズ発生を抑制するため、ACSR 810mm<sup>2</sup>×12導体を用い、がいし連に

はコロナ・フリーシャへい環をとりつけるとともに、1号鉄塔のジャンパーにライン・トラップを挿入した。

6. 接地装置(試験用変圧器雷害保護用)

この課電設備は、UHV変電所のプロトタイプではないので、避雷器を備えていない。そこで襲雷時には課電を停止し、母線を接地して変圧器を保護することとした。

この接地装置は、雷雲の直流電界により襲雷を検出する雷警報装置により、自動的に動作するものである。

しかし、この装置は動作に交流電源を必要とし、所内電源喪失時には保護できないので、電源がなくなると自動的に接地となる、自動跳ね起き型の補助接地装置を併設した。

7. 電圧制御および保護盤

課電設備の制御、および保護のため、マイクロ・コンピュータを内蔵した制御保護盤を制御室に設置した。

この盤は、集合故障表示盤を兼ね、装置の誤動作による過度の過電圧が加わらない

ようにするシーケンスを内蔵し、また、作業安全のためのインター・ロック関係に特に留意した。

後述するコロナ障害を両径間で測定するため、制御室の他に2号鉄塔北側にある測定室でも制御できるようにし、また、課電設備の遠方監視のため、工業用テレビを設置している。(坂本 雄吉)

#### 2-6-4 関連測定設備

本試験線では1~2号径間と、2~3号径間で異った導体構成とし、同時に障害特性を測定して、比較することが考えられているので、両径間にわたり、多くのセンサーを配置した。

これらのセンサーの出力は、すべて2号鉄塔の北側に設置した測定室に導びかれ、所要の変換処理をおこなった後、データプロセッサの磁気テープにデジタル量として記録される。また現地で全般的傾向を確認し得るとともに、データプロセッサ故障時の記録を補完し得るよう、主要な諸量は打点式記録計でも記録されている。

主要測定器の仕様を下記に列挙する。

1. コロナ騒音(AN)、風騒音測定設備
  - 全天候マイクロホン：1/2インチ・マイク、全天候ウインド・スクリーン付、22台(A-01~A-22)
  - 精密騒音計：IEC規格、A、B、C、F特性 3式
  - 実時間周波数分析：25Hz~20KHz、1/1、1/3オクターブ・フィルタ 3式
  - コロナ・ハム音測定装置：1インチ・マイク、10台(H-01~H-10)
2. ラジオ雑音(RI)測定設備
  - 全天候ループ・アンテナ：ブリ・アンブ付属、10式(R-01~R-10)
  - 雑音電圧測定器：旧JRTC規格仕様 5式、JRTC規格仕様 1式
  - 標準信号発生器：300KHz~30MHz、0~100dB $\mu$ V
3. テレビ雑音(TVI)測定設備
  - 全天候アンテナ・システム：YAGIアンテナ、ブースタ付属 6組(T-01~

T06)

●テレビ雑音電圧測定器：新JRTC規格仕様、固定周波数 6組

●標準信号発生器：30MHz~3,000MHz、0~100dB $\mu$ V

4. コロナ損失測定設備：3台(各相)
5. オゾン測定設備：2台
6. 関連気象測定設備：1式

以上の他、樹木誘導電流測定装置を線下樹木にとりつけ、また携帯用暗視装置などを備えつけて、随時に使用できるようにしている。(坂本 雄吉)

#### 2-6-5 実証試験の進め方

現在は、ACSR 810mm<sup>2</sup>10導体を架設し、がいし連にはコロナ・フリー遮へい還をとりつけた状態で、試験線の長期課電を行っている。また随時1,300kVまでの電圧を印加して、気象条件とともに前述の障害諸量の測定を行うとともに、時には昇塔して電圧を印加し、コロナ放電点のチェックなどを

行っている。

今後、

1. がいし連遮へい環をコロナ・フリーの特殊なものから、実用の予定されているものに交換して、実用遮へい環の特性の検証、
2. 2~3号径間を10導体から8導体に架線変更しての、8導体の特性の検証、

などを当面予定しているが、その後、さらに6導体の特性の検証、がいし連の注水特性試験なども計画しており、また線下のヤードを利用した静電誘導関係諸試験なども、随時行っている。(坂本 雄吉)

#### 2-6-6 相間絶縁間隔の検証

##### I. 検証の必要性

UHV送電線の概念設計の結果によると、相間絶縁間隔が最も小さくなるのは、耐張鉄塔のジャンパー線と、その下側相のがいし装置シールドリング間であり、所要間隔が鉄塔形状決定に際して支配的要因となることが判明した(図2-6-6参照)。

図2-6-6 1,100kV送電線の相間クリアランス(耐張鉄塔)

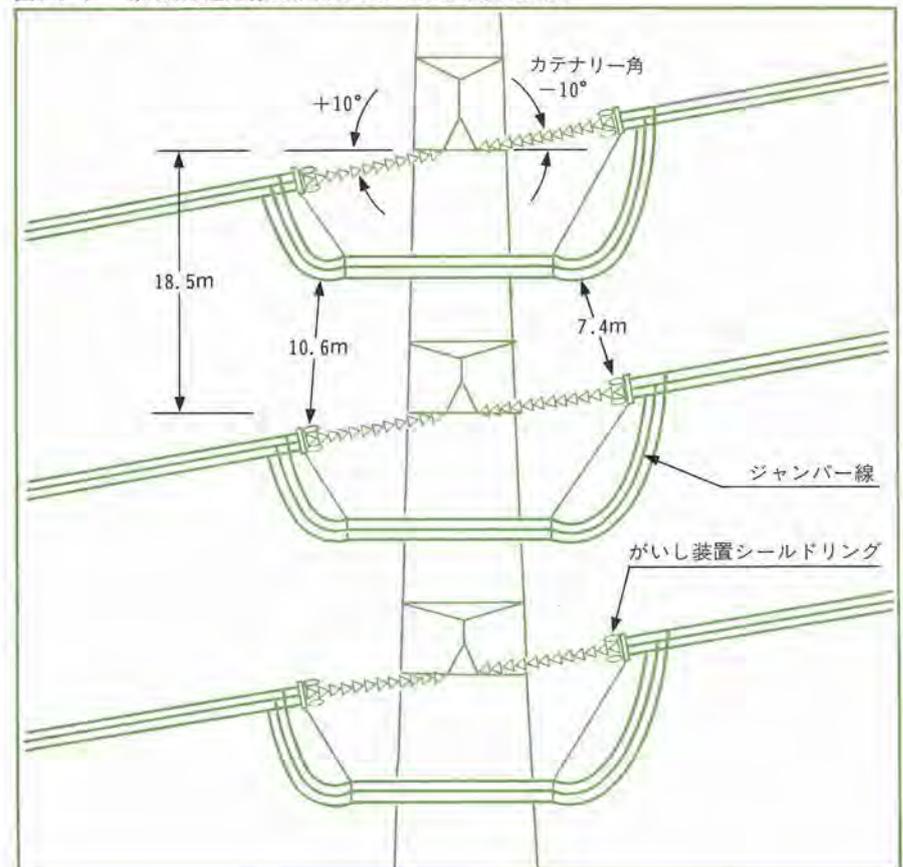


表2-6-2 試験計画一覧表

試験項目		試料名	ギャップ長	印加電圧波形	負電圧の割合 $\alpha_m$	正と負の電圧の時間差 $\Delta t$
相間 フラッシュオーバー 試験	(i) 平行導体	8 導体～8 導体 (ACSR 810 mm <sup>2</sup> )	8、10、11m	波頭長 85、150、300、600 1000( $\mu$ s) 波尾長 (2.5)、5(ms)	0 0.33 0.5	(ms) 0、(1)、2、4、8 (16)
	(ii)ジャンパー線 ～下側リング	ジャンパー線～ 下側がいし連金具	8、10、12m	"	0 0.33 0.5	-2、0、2、4、8 " (16)
対地 フラッシュオーバー 試験	(iii)耐張がいし 装置	○耐張がいし連 ○ジャンパー～塔体 ○ジャンパー～アーム	5、6、7、(8)m	"	—	—
	(iv)懸垂がいし 装置	○懸垂がいし連 ○導体～塔体 ○導体～下アーム	5、6、7、(8)m	"	—	—
	(v) V 吊がいし 装置	○V吊中央クリアランス ○ジャンパー～塔体 ○ジャンパー～下アーム	5、6、7、(8)m	"	—	—
	(vi) 近接物体 との 離隔	○8 導体～箱型金網 ○8 導体～直交導体	6、8、10m	"	—	—
	(vii) 安全距離	○ジャンパー～人体モデル	5、6、7、(8)m	"	—	—

一方、相間開閉サージに対する気中ギャップのフラッシュオーバー特性については、近年解明が進み、各種パラメータの影響が明らかになりつつあるが、試験された電極形状としては、平行導体、直交導体、リング等のものであり、そのまま上記の部分の設計には適用できないと考えられる。

特に山岳地において鉄塔間の高低差が大きく、がいし連が引き上げとなる個所では、鉄塔垂直間隔を広くする必要が生じる。

UHV 送電線は、経済性および環境上からも極力小形化することが必要であり、相間開閉サージに対するジャンパー～金具間の特性を把握することが、鉄塔小形化の限度究明につながる。

また、UHV 送電線の支持物は、鋼管材で構成され、かつ三角アームが使用されると考えられる。このような支持物構造の場合、電極構造を正確に模擬した気中ギャップの対地開閉サージフラッシュオーバー特性についても、十分なデータが得られているとはいえない。

今回計画中の相間開閉サージのための試験設備、および供試鉄塔は、対地開閉サージ試験も容易に行える能力を有しているので、併せて対地開閉サージ試験を行うことが望ましいと考えられる。対地開閉サージ試験の中には、建造物や、索道等に対する対物離隔の問題、および人体の安全離隔に関する検討も含まれる。

## II. 試験項目

表2-6-2 に試験項目を示す。

相間開閉サージ関係の試験としては、今回の主目的であるジャンパー～金具間(表2-6-2、(ii)のケース)の他に、門外でも試験データの得られていない、8 導体～8 導体(810m<sup>2</sup> ACSR、素導体間隔500mm)の試験(表2-6-2、(i)のケース)を計画して、現時点では終了した。

対地開閉サージ関係の試験としては、耐張装置、懸垂装置およびジャンパー支持用のV吊装置について実配置における検証を計画した。また、近接物体(建造物、索道

等)の離隔、作業中の人体に対する離隔距離についての検証も併せて計画した。

## III. 所要設備

設備の概要は、以下の通りである。

### 1. 既設設備

開閉サージ発生装置

開閉サージ発生電圧 2.3MV

発生波形 ～1×7ms

### 2. 新設設備

(i)開閉サージ発生装置

開閉サージ発生電圧 2.6MV

発生波形 ～1×7ms

(ii)供試鉄塔

基数 3基

相間試験可能間隔 ～12m

対地試験可能間隔 ～8m

(iii)付帯設備

制御室 60m<sup>2</sup>

測定装置(データ処理装置を含む)

注水設備

(坂本 雄吉)●

## 関連報告書等

1. UHV 送電研究推進委員会絶縁分科会「交流 UHV 送電の絶縁に関する基礎研究」総合報告：109(1981.12)
2. 松原他「UHV 230 km線路における開閉サージの大きさと波形の解析」研究報告：180076(1981.8)
3. 今野他「UHV 級がいし類の交流霧中耐電圧特性(その1)―武山 UHV 霧室における54トン懸垂がいしおよび250mm懸垂がいしの霧中耐電圧特性―」研究報告：179067(1980.6)
4. 新井他「同上(その2)―54トン懸垂がいしの塩汚損霧中耐電圧特性―」研究報告：180036(1981.4)
5. 新井他「同上(その3)―UHV ブッシング用がいしの汚損耐電圧特性―」研究報告：181003(1981.8)
6. 今野他「同上(その4)―UHV 用懸垂がいしのじんあい汚損耐電圧特性―」研究報告：181020(1981.12)
7. 高須他「長大気中ギャップの交流霧中フラッシュオーバー特性」研究報告：180043(1981.5)
8. 熊谷他「UHV がいし装置の絶縁特性(その3)」研究報告：180028(1981.1)
9. 熊谷他「同上(その4)」研究報告：18077(1981.7)
10. 相原他「棒―鉄塔、導体―鉄塔ギャップのインパルスフラッシュオーバー特性」研究報告：179050(1980.6)
11. 三宅他「非標準雷インパルス電圧に対する気中ギャップの V-t 特性の統計的解析」研究報告：177047(1978.4)
12. 半田他「電力系統に発生する大気中アークの自然消弧特性の予測」研究報告：177067(1978.5)
13. 半田他「UHV 送電線における二次アークの自然消弧特性」研究報告：181023(1982.1)
14. UHV 送電研究推進委員会絶縁分科会「交流 UHV 送電の絶縁に関する基礎研究」総合報告：102(1981.12)
15. 大和他「日本海沿岸の雷性状の検討事項と実測装置」研究報告：178075(1979.5)
16. 岸嶋他「柏崎、刈羽地点の冬季雷撃電流の測定結果(その1)」研究報告：180070(1981.7)
17. 多田他「雷撃現象自動撮影装置による自然雷の撮影」研究報告：178021(1981.7)
18. 三宅他「冬季雷の雷撃進展ならびに静止写真観測結果(その1)」研究報告：81008(1981.8)
19. 多田他「UHV 実規模試験送電線における雷観測 昭和56年度の雷撃路観測結果」研究報告：181025(1981.12)
20. 鈴木他「送変電設備への雷撃現象(その3)」研究報告：179010(1979.10)
21. 井上「電荷量―電圧曲線を基にした高電圧進行波伝搬方程式」研究報告：181042(1982.4)
22. UHV 送電研究推進委員会絶縁分科会「交流 UHV 送電の絶縁に関する基礎研究」総合報告：109(1981.12)
23. 藤波他「SF ガスの短時間領域 V-t 特性」研究報告：180012(1980.10)
24. 藤波他「ガス絶縁断路器模擬ギャップにおける局所火花の絶縁特性に及ぼす影響」研究報告：181005(1981.7)

## 2-2

## 2-3

1. 沢田他総合報告：7(1970.6)
2. 沢田他「交・直流架空送電線の電波障害および誘導障害」総合報告：23(1973.8)
3. UHV 送電研究推進委員会「大電力直流送電に関する基礎研究」総合報告：107(1981.10)
4. UHV 送電研究推進委員会障害分科会「UHV 交流送電線の障害対策に関する基礎研究」総合報告：110(1982.5)
5. 福島他「塩原実験送電線および超高研500kV変電所における部分放電音の実測」研究報告：71063(1972.2)
6. 福島他「交流送電線の部分放電音(コロナ騒音)(IV)、電線コロナ騒音の予備的検討」研究報告：176067(1977.6)
7. 福島「UHV 交流送電線の騒音と雑音(V)―コロナ騒音の降雨

- 強度特性と Project UHV から我が国へのデータ変換法—」研究報告：177057(1978)
8. 笹野「UHV 交流送電線の騒音と雑音(VI)BPA ライアンス1,200 kV試験送電線のラジオ雑音とコロナ騒音—」研究報告：177059(1978)
9. 福島他「UHV 交流送電線の騒音と雑音(VII)—UHV コロナケージによる導体コロナ特性の測定」研究報告：177088(1978.7)
10. 笹野他「UHV 交流送電線の騒音と雑音(IX)—UHV コロナケージによる1,000~1,200kV級送電線のコロナ特性の測定」研究報告：178060(1979.7)
11. 田辺他「UHV 交流送電線の騒音と雑音(XI)—UHV コロナケージによる10導体電線のコロナ騒音の測定—」研究報告：179073(1980.7)
12. 田辺他「UHV 交流送電線の騒音と雑音(XII)—風騒音防止用スパイラル線の影響および電線表面処理の効果(10×810mm<sup>2</sup>)」研究報告：181024(1981.12)
13. 鈴木他「交直流送電線のテレビ雑音(第1報)—火花放電テレビ雑音特性—」研究報告：177072(1978.6)
14. 鈴木「交直流送電線のテレビ雑音(第2報)—Gapを雑音源とした場合の伝搬放射特性—」研究報告：179069(1980.8)
15. 電研、送電機能研究委員会「500kV送電に関する研究報告その8電波問題」(1971.9)
16. 橋本他「送電線路によるテレビ電波障害発生機構と障害範囲予測計算法」総合報告：31(1976.6)
17. 岩崎「送電線路によるテレビ電波障害範囲の図形表示方式(その2)」研究報告：180027(1981.1)
18. 橋本他「410mm 8導体電線によるテレビ電波障害範囲の予測計算結果」研究報告：178013(1978.9)
19. 橋本他「6導体電線によるテレビ電波障害範囲」依頼報告：179522(1980.3)
20. 電研「UHV 送電電圧検討のための基礎資料」(1978.7)
21. 金丸他「VHF 帯テレビ電波の空間電界分布(その5)」研究報告：178007(1978.7)
22. 金丸他「UHF 帯テレビ電波の空間電界分布」研究報告：180030(1981.2)
23. 金丸他「VHF 帯テレビ電波の空間電界分布(その3)」研究報告：176030(1977.2)
24. 豊田他「鉄塔によるテレビ電波障害発生機構(その4)」研究報告：175007(1975.8)
25. 豊田他「鉄塔によるテレビ電波障害発生機構(その6)」研究報告：175037(1976.4)
26. 岩崎他「送電線路によるテレビ電波障害範囲の図形表示方式(その3)」研究報告：181029(1982.3)
27. 豊田他「鉄塔によるテレビ電波障害発生機構(その7)」研究報告：176051(1977.6)
28. 金丸他「VHF 帯テレビ電波の空間電界分布(その6)—山岳および丘陵伝搬路の中高度特性—」研究報告：179051(1980.6)
29. 岩崎他「電線弛度を考慮した多導体電線によるテレビ電波散乱特性の解析」研究報告：181027(1982.5)
30. 中村他「500kV送電線路の気中コロナ放電によって発生するオゾン濃度の推定」調査報告：177004(1977)
31. 矢田部他「送電線の気中コロナ放電によって発生するオゾン—UHV コロナケージによるオゾン濃度の測定—」研究報告：279008(1979.8)
32. 電研、500kV送電実証試験研究委員会「500kV送電設備の実証試験研究報告(その4)静電誘導とコロナ雑音」(1972)
33. 河本他「標準球ギャップにおける大地、支持棒の電界におよぼす影響—一般三次元場の電界計算—」研究報告：177019(1977.11)
34. 宅間他「三角形表面電荷による三次元電界の計算」研究報告：180029(1980.12)
35. 重光他「交流電界が実験動物に与える影響—小動物用の課電暴露設備」依頼報告：481010(1981)
36. 根岸他「交流電界が実験動物に与える影響—けっ歯類の成長、血液性状および性周期への影響」依頼報告：481508(1982.7)
37. 河村他「電界の生物学的影響に関する文献調査—植物に対する影響」調査報告：480020(1981.8)
38. 荻野他「UHV 交流送電線の樹木に与える影響 1.電気環境樹木反応基礎実験設備の諸特性」依頼報告：481509(1982.3)
39. 板久他「UHV 交流送電線の樹木に与える影響 2.樹木誘導電流とアースコロナ発生状況」依頼報告：481510(1982.3)

## 2-4

1. 電研、UHV 送電特別委員会「UHV 送電特別委員会中間報告書」(1982.5)
2. 電研、UHV 送電特別委員会線路部会「送電鉄塔の動的安定性の検討」(1982.5)
3. 北原他「UHV 赤城実規模試験線の動的試験—地盤物性調査および地盤物性試験」研究報告：380053(1981.4)
4. 花田他「UHV 赤城実規模試験線の動的試験—基礎の振動挙動とその力学モデル」研究報告：381039(1982.4)

## 2-5

1. 電研、UHV 送電特別委員会「UHV 交流送電に関する研究」委員会報告：Z82001(1982.5)
2. 梅津他「UHV 送電に関する考察」総合報告：1(1969.4)
3. 小川「UHV 交流送電線における線路直付分路リアクトル補償量の検討」依頼報告：182501(1982.5)
4. UHV 送電研究推進委員会(直流分科会、絶縁分科会、障害分科会)「大電力直流送電に関する基礎研究」総合報告：107



第 5 章

UHV 直流送電

## 第3章 UHV直流送電 ● 目次

3-1 要 旨	52
3-2 絶縁の信頼性評価	54
3-2-1 緒論と結論	
3-2-2 過電圧	
3-2-3 架空送電線の絶縁	
3-2-4 直流ケーブルの絶縁性能	
3-2-5 直流アーク現象	
3-3 障害防止	60
3-3-1 緒論と結論	
3-3-2 イオン流帯電	
3-3-3 ラジオ雑音	
3-3-4 コロナ雑音	
3-3-5 コロナ損	
3-3-6 生物への影響	
3-4 運用制御	67
3-4-1 緒論と結論	
3-4-2 原子力発電所からの直流単独送電	
3-4-3 交直並列送電システムの最大送電電力と安定度向上対策	
3-4-4 交流システムの直流分割による送電電力の向上効果	
3-4-5 交直並列多端子送電の制御・保護方式	
3-4-6 直流送電の運転能力向上方式	
3-5 試験送電線と関連設備	74
3-5-1 緒論と結論	
3-5-2 試験送電線	
3-5-3 直流電圧発生装置他	
3-5-4 コロナ障害測定設備	
3-5-5 研究の進め方	

執筆者紹介：( )内は担当箇所、順不同

瀬田 泰助：電力技術研究所 副所長(3-1)  
沢田 嘉嗣：電力技術研究所 系統絶縁部 部長(3-2編集担当)/尾野 孝夫：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室 室長(3-2-1,3-2-2)  
高須 和彦：電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室(3-2-3)/渡辺 泰夫：電力技術研究所 系統絶縁部 系統絶縁研究室(3-2-3)  
深川 裕正：電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室 室長(3-2-4)/今城 尚久：電力技術研究所 送配電部 地中送電研究室(3-2-4)  
半田 栄：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室(3-2-5)(昭.57.7.31付退職)/稲葉 次紀：電力技術研究所 系統絶縁部 電力遮断研究室(3-2-5)  
竹下 信也：電力技術研究所 電子応用部 部長(3-3編集担当,3-3-1)/宅間 董：電力技術研究所 系統絶縁部 次長(3-3-2)  
笹野 隆生：電力技術研究所 電子応用部 電気環境研究室(3-3-3)/福島 充男：電力技術研究所 電子応用部 電気環境研究室 室長(3-3-4)  
杉本 勉：電力技術研究所 系統絶縁部 放電研究室(3-3-5)/藤原 喬：生物環境技術研究所 緑地生物部 植物環境研究室 室長(3-3-6)  
町田 武彦：電力技術研究所 電力システム部 部長(3-4全部)/坂本 雄吉：電力技術研究所 特任研究員(3-5全部)

# UHV直流送電

電力技術研究所 副所長 瀬田 泰助

同一の大容量送電を行うとして、直流による送電は、現在の交流送電に比べ、送電線や鉄塔が小さくなり、用地や美観の観点から有利になるので、もう一つのUHV送電としてUHV直流送電の研究を推進している。

直流は交流に比べ、幾つかの利点をもっているため、注目している。例えば、1,000万kwという大電力を送電するのに、交流2回線では100万ボルト（対地電圧82万V）が必要であるが、直流では、50万V～65万V（対地電圧は同じ）で対応でき、この場合、直流送電は、交流送電に比べ、送電線や鉄塔が小さくなるので、用地や美観の観点から有利と考えられる。また、線路の充電容量などによる系統技術上の問題が少ない。このため、交流UHV送電と併行して技術開発を進める必要がある。

当所はこのため中央電力協議会の指針の下に、交流と同じく、絶縁設計、障害防止、系統技術について研究を進めると共に直流65万Vの試験送電線を用いて実証試験を行っている。実証試験では、幅50m、巨長750m、高さ76mの規模で、鉄塔4基（すなわち3径間）で構成した双極2回線の試験送電線を用い、技術と環境性の問題の解決に努力している。



# 3-1 要 旨

電力技術研究所 副所長 瀬田 泰助

直流送電線は一般に交流送電線より小形になり、線路充電容量などによる系統技術上の問題が少ない利点があるため、UHV 送電の場合にも充分、検討に値する。

しかしながら、直流送電に関する経験や実績は交流の場合にくらべて極めて少なく、試験研究すべき課題が多い。

本章では当所で実施してきた UHV 直流送電に関する基礎的研究結果と、UHV 塩原実験場に建設した UHV 直流試験線の概要などについて述べるが、その要旨は次の通りである。

## I. 絶 縁 設 計

直流の場合にも交流の場合と同じく、所要の気中絶縁間隔と碍子連の長さなどが絶縁設計では問題となる。

気中絶縁間隔は主として直流送電線に発生する過電圧に耐えるように設計することとなるが、この過電圧の発生原因は、交流の場合とは全く異なり、変換器の全電圧起動時とか、転流失敗時とか、インバータブロック事故時とか、いろいろな原因で発生する。これは直流送電線には交流の場合のように遮断器が無いこと、いや、未だ UHV 用直流遮断器が開発されていないことにもよるが、いずれにしても、このような各種の原因によって発生する過電圧の大きさ、およびその抑制対策について、シミュレータによって解析を行った。

その結果、避雷器を適切に設置し、かつ変換器の制御機能を充分なものにすれば、UHV 直流送電線に生じる過電圧は、常時電圧の1.7倍程度に抑制できる見通しを得た。

なおこのような過電圧に対する気中絶縁間隔のフラッシュオーバー特性は、交流における開閉サージ・フラッシュオーバー特性をそのまま使用し得る。

次に碍子数の所要長さであるが、交流の場合と同様に、汚損湿潤時における耐電圧特性によって主として決定される。

直流汚損耐電圧特性は、交流の場合とかなり異なるばか

りでなく、直流電圧による集塵作用によって、碍子表面が汚損され易いなどの直流特有の特徴をもっている。

このため自然条件下における直流250kVの課電暴露試験や、霧中における耐電圧試験などの試験研究を実施しており、現在までに、

1. 直流500kV程度の電圧まで、連結長と汚損耐電圧との間にはほぼ比例関係がある。
2. 直流汚損耐電圧は交流の場合より低下する傾向があるが、その程度は汚損の軽重によって影響される。

などの点を明らかにし、概念設計のためのデータを得ることができた。

なお、直流用ケーブルの絶縁特性あるいはその評価法も、直流の場合とかなり異なることが武山における直流500kV用 OF ケーブルの試験によって判明したが、関連電力会社とメーカーと共同で実施した長期課通電試験により、この試験のために開発供給した直流500kV OF ケーブルは、所期の性能を有していることを確認できた。

## II. 障 害 防 止

直流送電線の場合にも、ラジオ雑音やコロナ騒音など、電線その他から発生するコロナ放電に伴う障害が、交流の場合と同様に問題となるが、それらの特性は交流の場合とはかなり異なる。この主な原因は、電圧が直流であることに起因するイオン流あるいは空間電荷が特性に大きく影響するためである。

特にイオン流に伴って生ずる地上物体の帯電現象は、交流ではみられない新しい現象であり、この抑止策が電線地上高を決定する主要因となる。

当所では塩原実験場その他において、これら障害の特性および抑止対策について基礎的研究を行い、ラジオ雑音およびコロナ騒音レベルの暫定的な予測算法、イオン流帯電現象の近似計算法、碍子連の部分せん絡による騒音とその防止対策などについて一応の成果を得ることができた。



UHV 直流試験送電線(UHV 塩原実験場)

これら成果を基として、当所では昭和57年6月に塩原実験場に直流500kV級の2回線双極試験送電線を建設し、UHV 直流送電線に関する実証的研究を開始した。本試験線は、線間間隔、地上高などを自由に变化し得る特徴を持っており、効率的に各種データを取得できるものと期待している。

### Ⅲ. 運用制御

直流送電の場合、変換所の運用制御方法は重要な検討課題である。特に大電力を送電するUHV 直流送電の場合には、従来より更に信頼性の高い運用制御方法を検討しなければならない。

当所ではこのため基礎研究用サイリスタ変換装置その他を使用して各種の実験解析を行い、

1. 原子力電源による大電力を直流双極2回線で送電する場合、1線地路では安定運転が確保でき、2線地路でも0.5秒程度以内に故障線路を再起動すれば安定であること。

2. UHV 交流と直流の並列系統で送電する場合、交流のみで送電する場合より送電可能電力を増大し得ること。

3. UHV 交流と直流3端子の並列系統の場合でも、当所で開発した直流多端子集中制御方式が性能よく動作すること。

などの結果を得ている。

なおこれらについて更に詳細に実証的機能検証を行うため、大規模な直流電力系統シミュレータを現在狛江事業所に建設中である。

## 3-2 絶縁の信頼性評価

担当●電力技術研究所 系統絶縁部 部長 沢田 嘉嗣

### 3-2-1 緒論と結論

直流送電において、事故防止の点から絶縁に関する課題を要約すると、図3-2-1のようになるが、当所では図の1～4の課題を中心に研究を進めている。

絶縁破壊事故は多くの場合、何らかの原因で過電圧が生じた時に起るので、過電圧の原因、大きさ、抑制方法などを解明しておく必要がある(図中、1、2)。一方、各種の機器や送電線の絶縁部分(がいし、ケーブル、空気による絶縁部分など)が、どのような大きさや波形の過電圧に対して、どのように耐えるかという特性を知らなければならぬ(図中、3)。

図3-2-1中の1、2と3を合わせると、具体的にどのような設計をすれば良いか、判断できる。また、万一事故が起きた時の対策として、どのようにしてその事故を復旧するかを考えておかねばならない(図中、4)。

この節では、当所で行っている研究内容の例と結果の概要を述べる。

(尾野 考夫)

### 3-2-2 過電圧

直流送電システムにおいても、送電線の事故や、交直変換器の誤動作・故障等の種々の原因によって、正常運転時の電圧以上の過電圧が生じる事がある。当所ではその様相を知るために、図3-2-2に示す「直流送電システム異常電圧シミュレータ」やデジタル手法を用いて解析を進めている。

#### I. 送電線に発生する過電圧

事故の拡大を防ぐためには、過電圧で絶縁破壊が生じないようにする必要がある。当所では、送電線の1つの線が地絡事故を生じた時に、他の健全な線に誘導により現れる過電圧や全電圧起動と呼ばれる一種の制御誤動作(直流から交流に変換する逆変換器が働いていない状態で、誤まって

順変換器が定格電圧を線路に印加)の時に生じる過電圧と、避雷器を線路に設置した場合の過電圧抑制効果を調べた。

その他、送電線に比較的大きな過電圧が発生する原因として、転流失敗と呼ばれる変換装置の誤動作や、インバータブロック事故と呼ばれる逆変換装置の事故がある。

これらの原因による過電圧についても解析の結果、避雷器の適切な設置や、変換器の制御機能を適切に設定することにより、送電線に生じる過電圧は、正常時電圧の1.7倍程度に収まる事が判明した。

UHV変換所に生じる過電圧の解析については、これから引続いて実施する予定である。

#### II. 避雷器の責務

過電圧を抑制するために、避雷器が用いられる。

過電圧が生じると、避雷器に電流を流すことによって過電圧のもつエネルギーを吸

図3-2-1 絶縁に関する課題

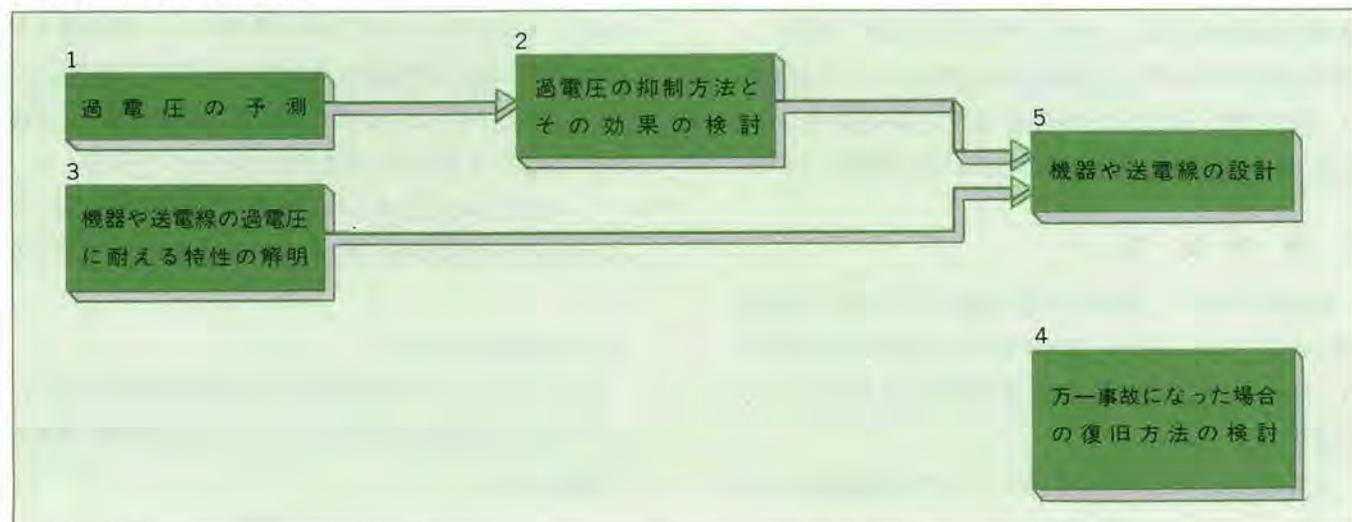


図3-2-2 直流送電系統異常電圧シミュレータ

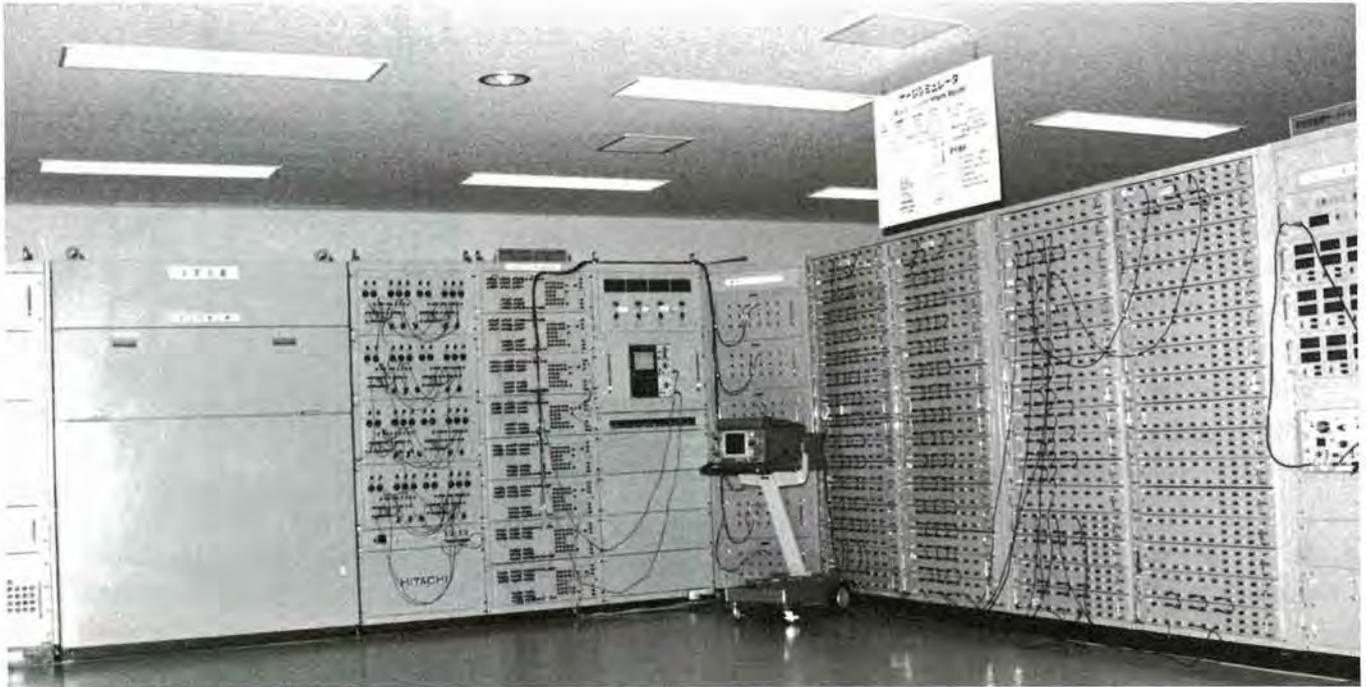


図3-2-3 直流用避雷器と交流用避雷器の責務の例

収し、過電圧を抑制する。したがって、避雷器の能力以上のエネルギーを吸収すると破壊するので、どの程度、エネルギー処理能力を要求されるか知っておく必要がある。

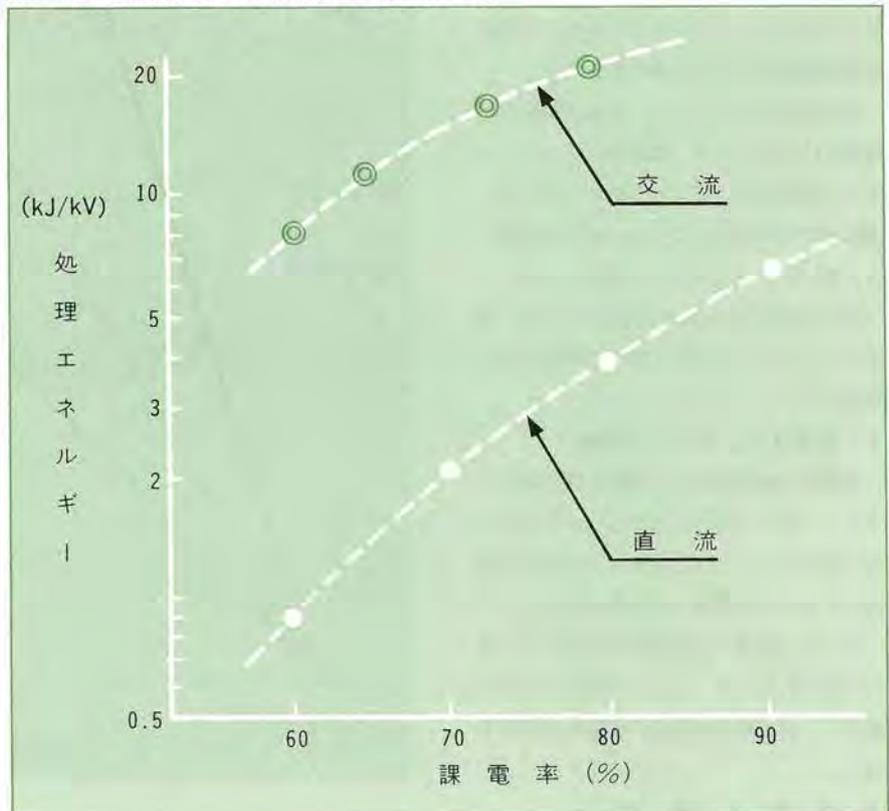
当所はこのための解析や実験を続けている。図3-2-3は、UHV交流送電線とUHV直流送電線に設置される避雷器の、それぞれの最も厳しい条件での要求される処理エネルギーを検討した例であり、直流系統用避雷器の方が、責務が軽い事を示している。  
(尾野 孝夫)

### 3-2-3 架空送電線の絶縁

#### I. がいし類の耐汚損設計

直流送電線の絶縁設計を行う場合、台風、冬季季節風、雪など自然環境の厳しい日本では、がいし、がい管の汚損耐電圧特性は交流の場合と同様、極めて重要である。

直流汚損フラッシュオーバー電圧は、交流の場合より電源容量の影響を受け易いため、500kV大容量直流発生装置(図3-2-4 参照)を、交流プロトタイプ変圧器と組み合わせた回路により、人工汚損がいしの霧中耐電圧実験を実施している。



一方自然条件下における、がいし類の諸特性を把握するため、武山、米沢(東北電力㈱と共同)、塩原実験場などで長期課電暴露実験を実施している。

現在までに得られた結果を要約すると、次のようにまとめることができる。

1. 懸垂型がいしの汚損耐電圧は、試験電圧が500kVまでの範囲で、がいし連結長と

ほぼ正比例の関係にある(図3-2-5 参照)。

2. 直流汚損フラッシュオーバー電圧は、試験条件が同じ場合には、交流の場合に比べて低くなる傾向にある。

3. 自然条件下におけるフラッシュオーバー電圧は、人工汚損がいしの霧中耐電圧特性に比べて高いところに分布している。

これらの結果は、UHV 直流送電線の概念設計に反映されており、送電電圧が500kV の場合のがいし連結長は、じんあい地区(塩分付着密度 $0.01\text{mg}/\text{cm}^2$ )で5.5~6.0m、重汚損地区(塩分付着密度 $0.12\text{mg}/\text{cm}^2$ )で10~12 m程度となる。(高須 和彦)

## II. 気 中 絶 縁

直流送電線の気中絶縁は、交流送電線と同様、運転電圧、内部過電圧によってフラッシュオーバー事故が発生しないようにする必要がある。したがって、それぞれの電圧に対する気中ギャップのフラッシュオーバー特性が絶縁間隔の決定のために必要です。

内部過電圧に対しては、交流送電線の絶縁設計に用いられる、開閉サージフラッシュオーバー特性を用いることが適切であるが、運転電圧が直流電圧のため、交流送電線とは、異ったフラッシュオーバー特性となる。

以下、当所で行われた気中ギャップの、直流フラッシュオーバー特性に関する研究結果を紹介する。

### 1. 直流フラッシュオーバー特性

送電線の絶縁設計で、運転電圧に対するフラッシュオーバー特性を考慮しなければならない気中ギャップは、強風により電線が横振れしたときの電線一支持物間である。

そこで、電線一支持物間に相当する、棒一平板の直流フラッシュオーバー特性について測定し、送電線の絶縁設計に必要な特性を得た。

### 2. 湿度 の 影 響

図3-2-6 に当所で行った、直流フラッシュオーバー電圧に及ぼす湿度の影響に関する研究結果を示す。現在 IEC(International Electrotechnical Commission)で推奨している湿度補正係数は、小さ過ぎることが

図3-2-4 500kV直流発生装置

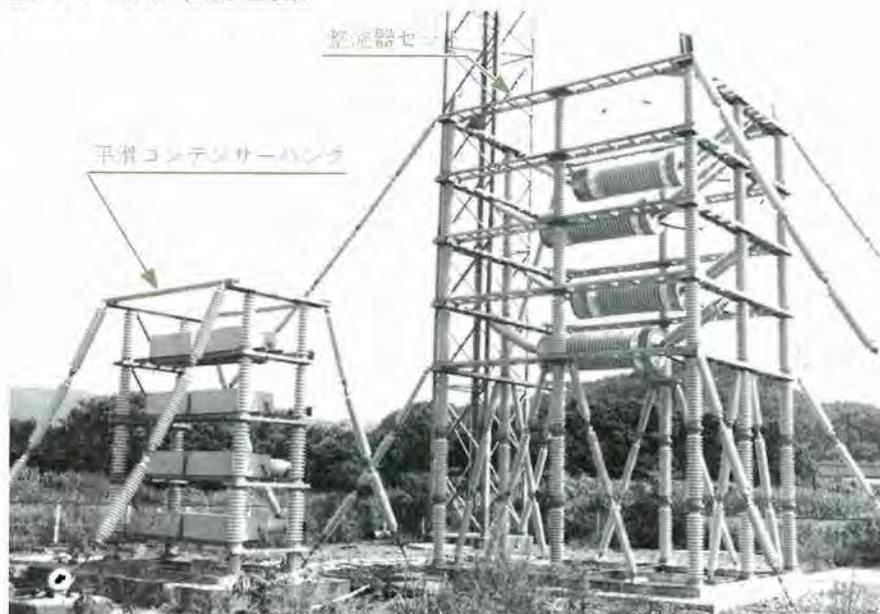
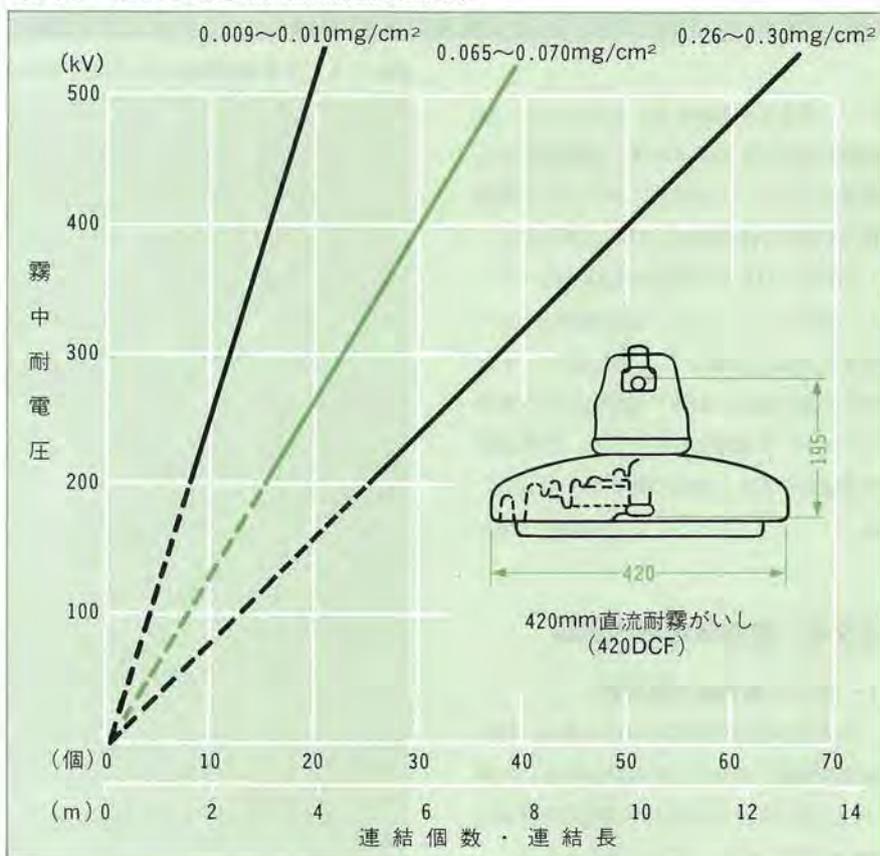


図3-2-5 がいし連結個数と直流耐電圧との関係



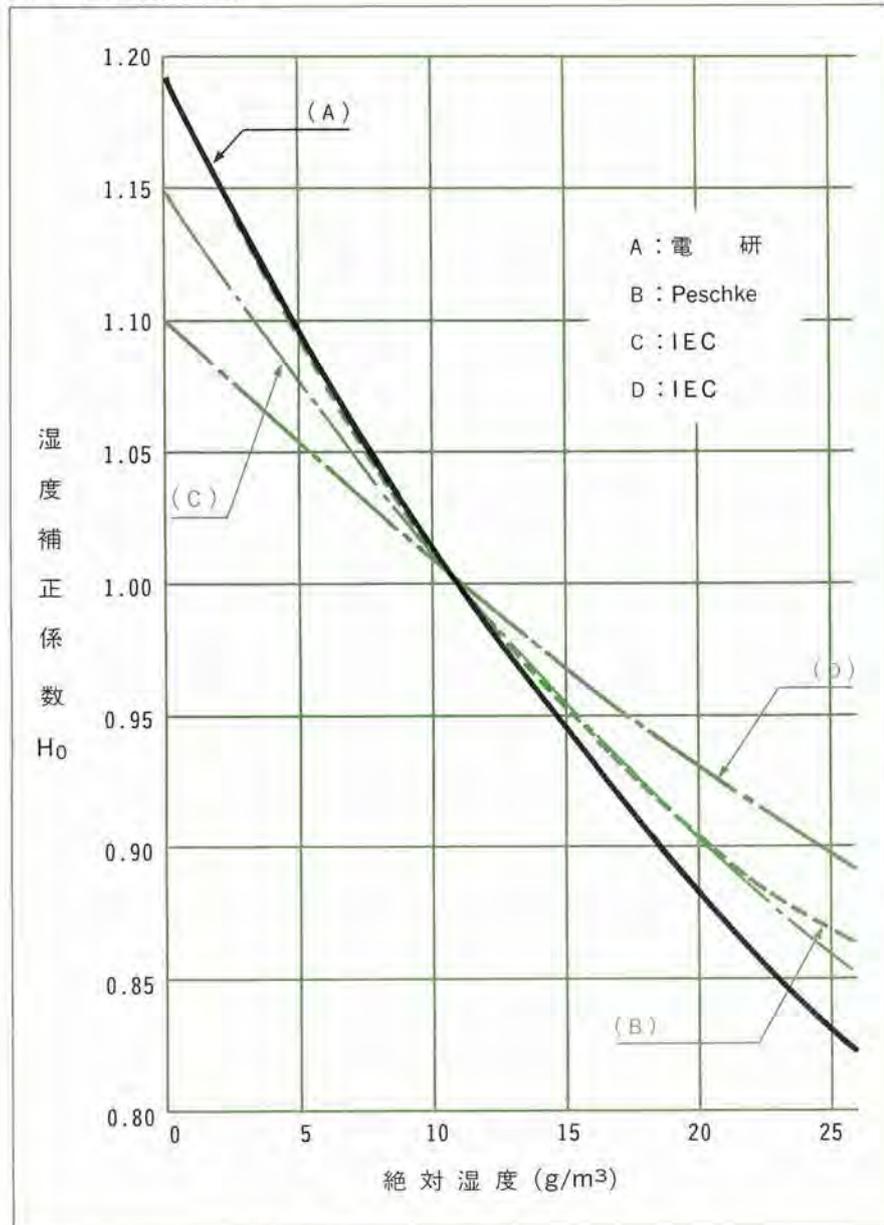
判明した。(渡辺 泰夫)

### 3-2-4 直流ケーブルの絶縁性能

1964年、ゴッドランド島への送電に直流海底ケーブルが使用されて以来、世界では

主に、長距離海底ケーブル送電に、直流ケーブルが使用されている。我が国においても北海道~本州連系で250kV OFケーブルが布設され1979年末から運転されている。直流ケーブルでは、交流ケーブルで問題

図3-2-6 湿度補正曲線



となる熱機械的問題に加えて、絶縁体内温度分布の変化に伴う、最大電界強度の変化（ストレス逆転現象）、潮流反転に伴う極性反転現象、空間電荷の挙動など直流ケーブルに固有の問題があり、直流ケーブルの実用化に当たっては、これらの問題を十分解明しておく必要がある。

北海道・本州連系に伴う、直流ケーブル開発の機会に、当所では、関連電力会社の協力の下で、ケーブル製造会社と共同で、500kV OFケーブルおよび250kV CVケーブルの開発研究に、着手した。

これらの研究プロジェクトは、1971年から5年間にわたって行われ、数々の成果を得て終了したが、ここではUHV直流ケーブルの絶縁性能という観点から、500kV OFケーブルに関して、得られた成果を記すこととする。

#### 1. 500kV OFケーブルの絶縁性能

直流ケーブルにおいても、交流ケーブルと同様な、熱機械的挙動の下での長期的絶縁性能の信頼性を、検証することが必要である。

また、直流ケーブルはCIGRE SC-21が推奨する、形式試験に耐えることが通常要求される。この試験は、あらかじめ機械的な曲げ試験を受けたケーブルサンプルに対して、定格電圧の2倍の正・負極性電圧を各10日間づつ印加した後、定格電圧の1.5倍の電圧を印加し、4時間間隔で、極性反転を10日間行うものである。

このため、前者の長期試験は、長尺ケーブルサンプルで(図3-2-7参照)、後者のCIGRE推奨形式試験は短尺ケーブルサンプルで実施された。なお、ケーブル含浸油としては、粘性の影響を把握するために、ハードアルキルベンゼン油とソフトアルキルベンゼン油が検討された。

#### 1. CIGRE推奨形式試験結果 1. (短尺ケーブル試験結果)

定格電圧の2倍(1,000kV)の電圧の印加中に、いくつかのケーブルサンプルで絶縁破壊が発生した。これは、導体の変形、絶縁体の不整によるものであると推定され、直流ケーブルは、交流ケーブル以上に、この様な欠陥に敏感であることが明らかにされた。

また、ケーブルヘッド碍管での汚損に伴う、外部フラッシュオーバーが発生した。碍管表面の電位分担が、湿度や汚損状態により、大きく変化するために生ずるもので、重汚損地区での碍管漏洩距離は、十分とっておく必要がある事が、明らかにされた。シリコン塗布は、短期的に十分効果のある事が確認された。

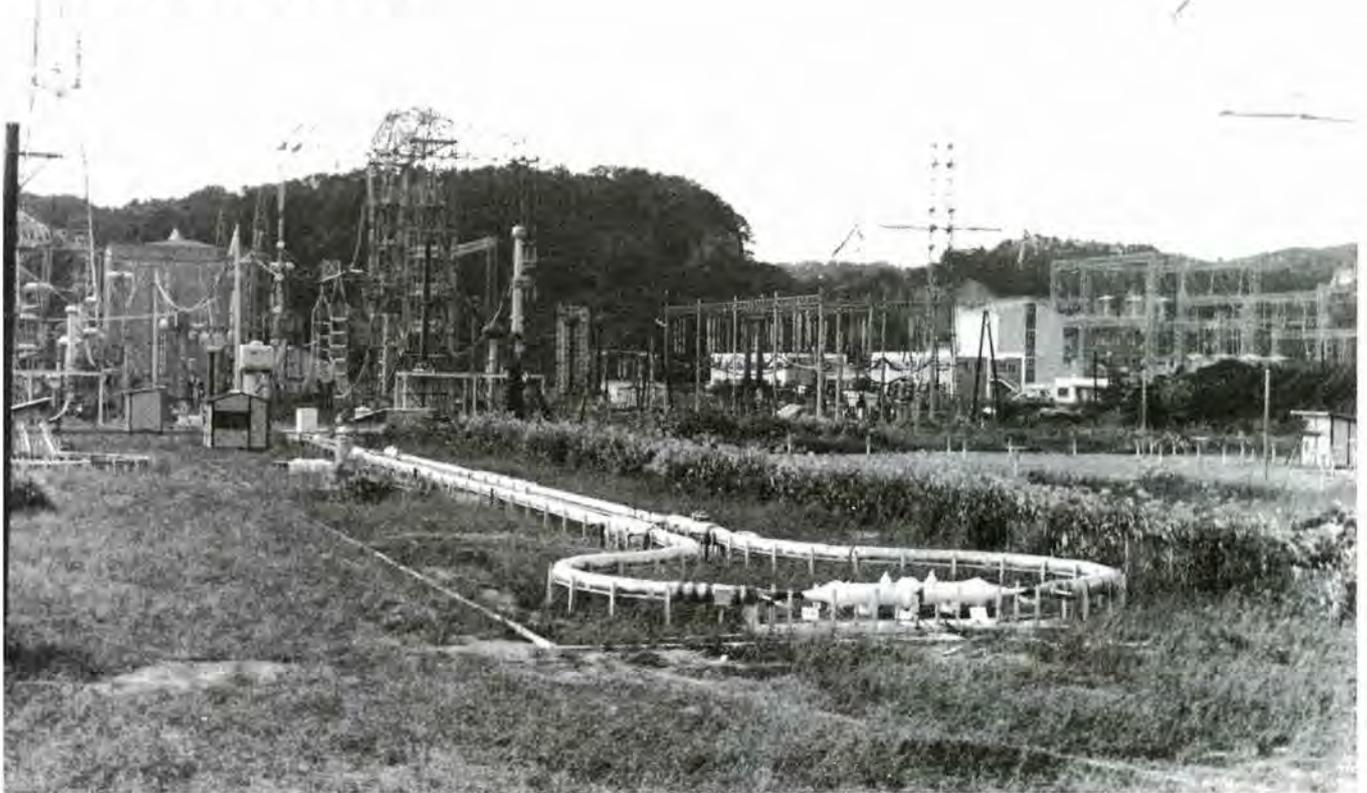
種々のトラブルは経験したものの、最終的には、CIGRE推奨形式試験に各サンプルとも耐え、試験前後に測定された $\tan\delta$ には、ほとんど変化は見られず、500kV OFケーブルとして、十分な性能を有していることが判明した。

#### 2. 長尺ケーブル試験結果

定格電圧の1.1倍から1.3倍の電圧を200mのケーブルに印加し、定格のケーブル導体温度にあげて、熱機械力を加えた長期課通電試験が行われた。

普通、接続部に隣接したケーブル部で、

図3-2-7 長尺 OF ケーブル試験サンプル



絶縁破壊が生じた。

前述した様に、絶縁紙のしわや紙切れ、絶縁層の著しい不整、ソフトスポットの発生が見られ、直流ケーブルは、熱機械的特性に、特に敏感な事が確認された。

絡端部には、ストレスコーン型とコンデンサコーン型とが用いられたが、前者は、極性反転時に、内部治面閃路を経験しており、後者の方が望ましい事がわかった。

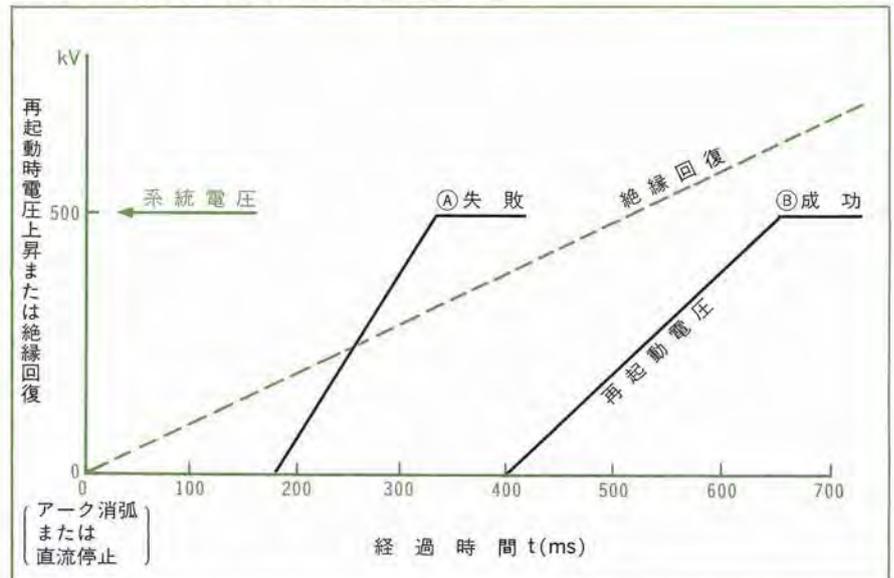
最終的には、長期間の課通電に耐え、所期の絶縁性能を有していることが確認された。なお、同程度の交流電圧を印加した時の推移と、比較すると、劣化の進行は、直流ケーブルは、交流電圧印加よりゆっくりしている様に考えられる。

## II. 試験法に対する提案

一連の短尺、長尺ケーブルによる結果から、以下のような試験法に関する提案を行った。

1. OFケーブルの固有絶縁抵抗は、電圧の2~3乗に比例して増加するので、UHV直流ケーブルのCIGRE推奨試験では、熱

図3-2-8 500kV直流送電線の再起動成否を示す図



破壊をおこさぬ様に、慎重な外部熱絶縁を施す必要がある。

2. 空間電荷の凍結現象を加味すれば、直流電圧に逆極性サージ電圧が重畳した場合が、最も苛酷である。このため、CIGRE推奨試験に、これを加味すべきである。

世界では、600kV OFケーブルの開発試験

が米国、伊国で行われている。我が国の500kV OFケーブルの経験から、この程度までは、特に大きな技術的問題点は、ないものと考えられる。

UHV直流ケーブルとしてOFケーブルを用いる限り、十分実用に供し得るものと、判断する。(深川 裕正、今城 尚久)

図3-2-9 水冷パイプ式高速度しゃ断装置

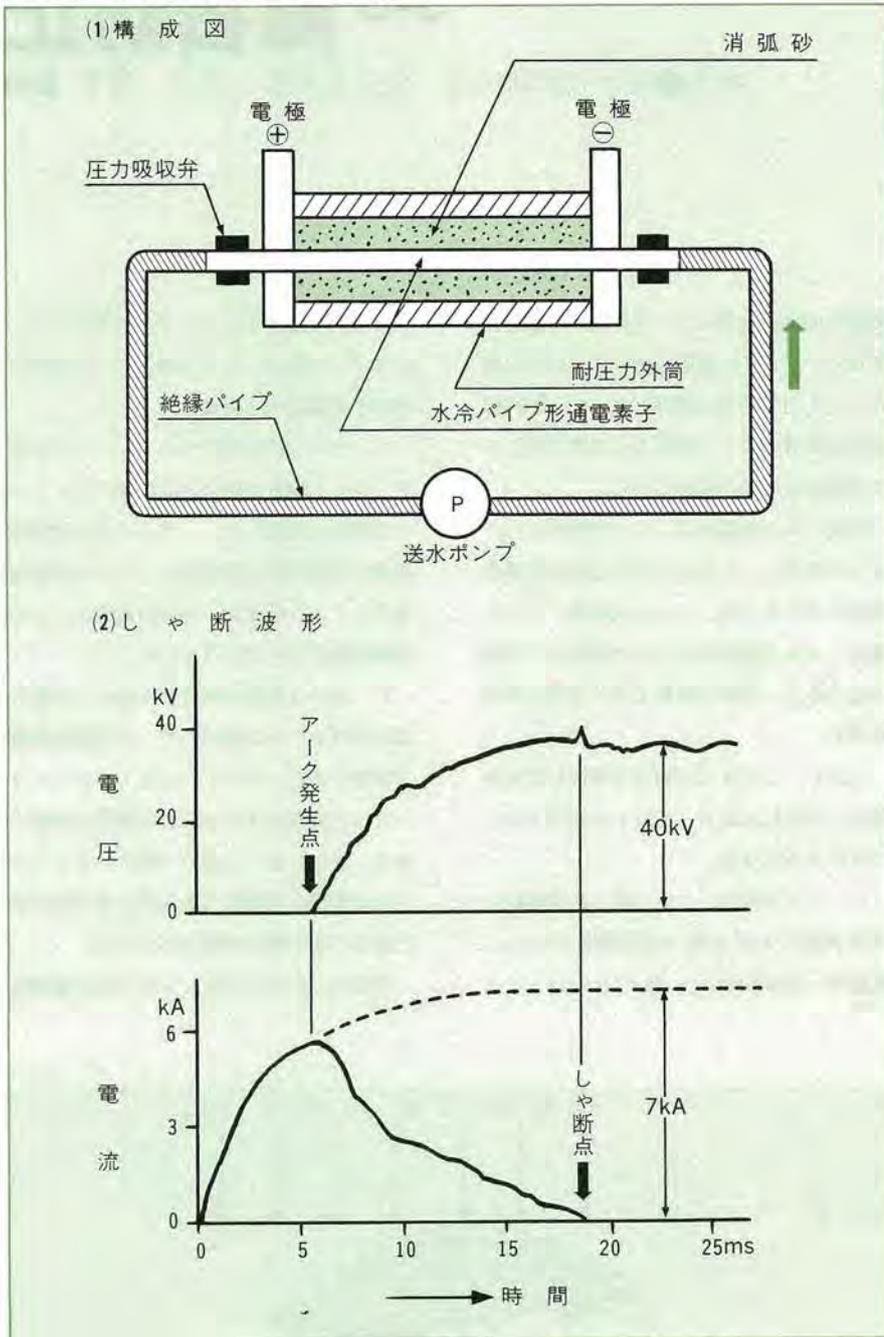
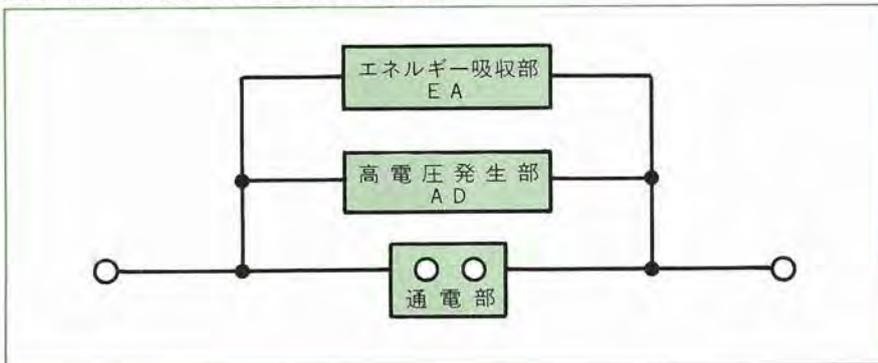


図3-2-10 負荷電流しゃ断用二段転流しゃ断器



### 3-2-5 直流アーク現象

#### I. 絶縁回復特性

本線が地絡すると、変換所では変換器を操作して送電を停止する。これによって地絡アークを除去した後、地絡個所の絶縁回復を待って再起動する。この関係を図3-2-8に示す。実線が再起動時の電圧上昇を、おおまかに示したものである。点線は、地絡個所の絶縁回復特性で、両者が交交しない(例えば図中のB)様に、再起動させれば良いことがわかる。(半田 栄)

#### II. 直流しゃ断器の適用

UHV 直流系統における、直流しゃ断器の適用目的としては、

1. 交直変換用半導体の保護
2. 並列回線の切換え操作

などが考えられ、用途別に、以下のしゃ断方式を検討している。

##### 1. 半導体保護用高速しゃ断装置

交直変換器には、半導体が使用されているが、直流側の母線や、半導体を支持するアームで、地絡などの事故が発生すると、半導体には定常電流の何倍もの大電流が流れる。この故障電流をピーク値に達する前に、高速度でしゃ断するために、高速度直流しゃ断装置を研究中である。一例を図3-2-9に示す。通電部をパイプ状とし、内部に冷却水を通すため、通電能力が高い上に、故障電流に対しては、高速度しゃ断できる特徴がある。

##### 2. 並列回路切換え用負荷電流しゃ断器

回路を計画的に切換えるため、負荷電流を、しゃ断する。特に高速動作を必要としないため、通電部と高電圧発生部とを分離した、複合方式を検討している。

一例を図3-2-10に示す。通電部には汎用の接触子を、高電圧発生部には高圧力密閉素子、またはコンデンサを、また、エネルギー吸収部には、高性能の酸化亜鉛素子を使用することで、構成要素が少なく、低廉で信頼性の高いしゃ断器を目標としている。

(稲葉 次紀)●

# 3-3 障害防止

担当●電力技術研究所 電子応用部 部長 竹下 信也

## 3-3-1 緒論と結論

直流送電線の電線およびがいしから発生するコロナ放電は、交流送電線の場合と同じように、ラジオ雑音やコロナ騒音を放射し、沿線の電気環境に無視できない影響をおよぼす。

直流送電線を建設するに際しては、線路周辺の電気環境保全にじゅうぶん配慮する必要がある。また、コロナ放電に起因するイオン流帯電(交流の場合の静電誘導に対応)は送電線の地上高を支配し、ラジオ雑音、コロナ騒音は電線の導体構成に関係する重大な要因となる。

当所は、昭和45年より線間500kVおよび部分的には1,000kVまでの直流送電線のコロナ障害に関する研究を始め、さらに UHV

双極2回線送電線のコロナ障害の予備的研究を行い、UHV 塩原実験場にこのほど竣工した UHV 直流試験線によって、2回線直流送電線のコロナ障害を、世界ではじめて本格的に研究を進めている。

直流コロナ放電によって、空気中にはイオンが発生し、しかもこれらは風の影響を微妙に受けるため、イオン流帯電、ラジオ雑音、コロナ騒音などコロナ障害は、交流と比べると、現象が複雑で未だ不明な事項も多い。

しかし、これまでの研究で重要な結果が数多く得られており、それらを要約するとつぎようになる。

1. ラジオ雑音、コロナ損と素导体数、導体表面における最大電位傾度  $G_{max}$ 、極配列、気象条件など、種々のパラメータと

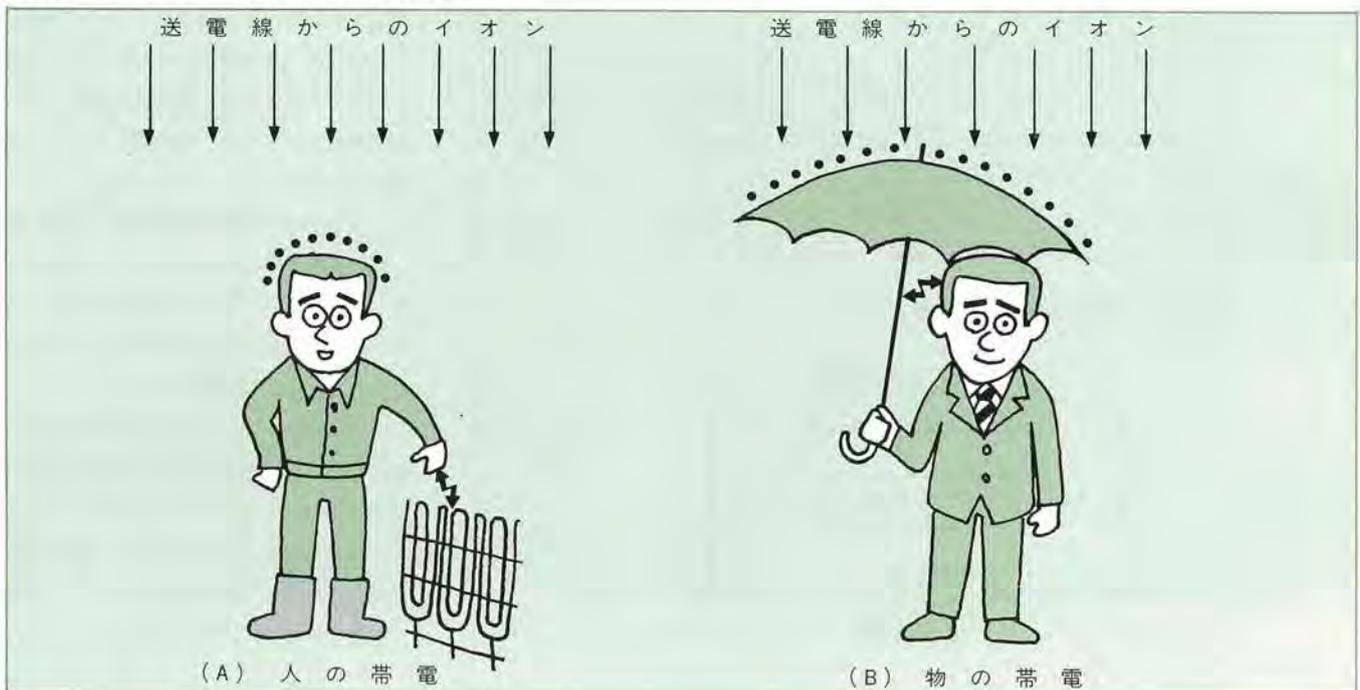
の関係を実測解析した。その結果にもとづいてラジオ雑音、コロナ騒音レベルの暫定的な予測定法を提案した。

2. イオン流帯電についても、ラジオ雑音、コロナ騒音の場合と同様なパラメータとの関係を実測した。一方、イオン流帯電現象の近似計算法を開発し、イオン流帯電電圧とイオン流密度、地表面電界などとの関係を解析できるようにした。

3. がいし装置の部分せん絡による騒音はかなりレベルが高いため、その防止対策は重要である。その1つとしてダブルスカートなど特殊形状のがいしの開発が有望である。また、がいし連の一部にシリコングリスの塗布が効果的であるが、その耐久性と保守方法の検討が残されている。

今後は、このほど竣工した UHV 塩原直

図3-3-1 直流送電線からのイオンによる帯電



流試験線により、UHV 直流送電線の設計に必要なデータを得るため、直流コロナ障害に関する研究を精力的に進める所存である。(竹下 信也)

### 3-3-2 イオン流帯電

イオン流帯電は、直流送電線に特有の現象である。

直流送電線の電線表面では弱い放電(コロナ放電)が生じ、イオンが発生するが、電線が正極性のときは正イオン、電線が負極性のときは負イオンが地面に向かって流れる。

流れてきたイオンは地表の物体に流れ込み、この物体が絶縁されていると、(大地に対する抵抗が大きいと)高い電圧に帯電され、接地されたものに触れると放電する。

このため、図3-3-1に例を示すように、次の場合に人が電氣的刺激や不快感を感じる可能性がある。

1. イオン流で帯電した人が接地されたものに触れたとき
2. 帯電した物体に接地状態の人が触れたとき

我が国では、UHV 直流送電の場合、送電線の高さがイオン流帯電で決定されると予想されているので、非常に重要な問題である。

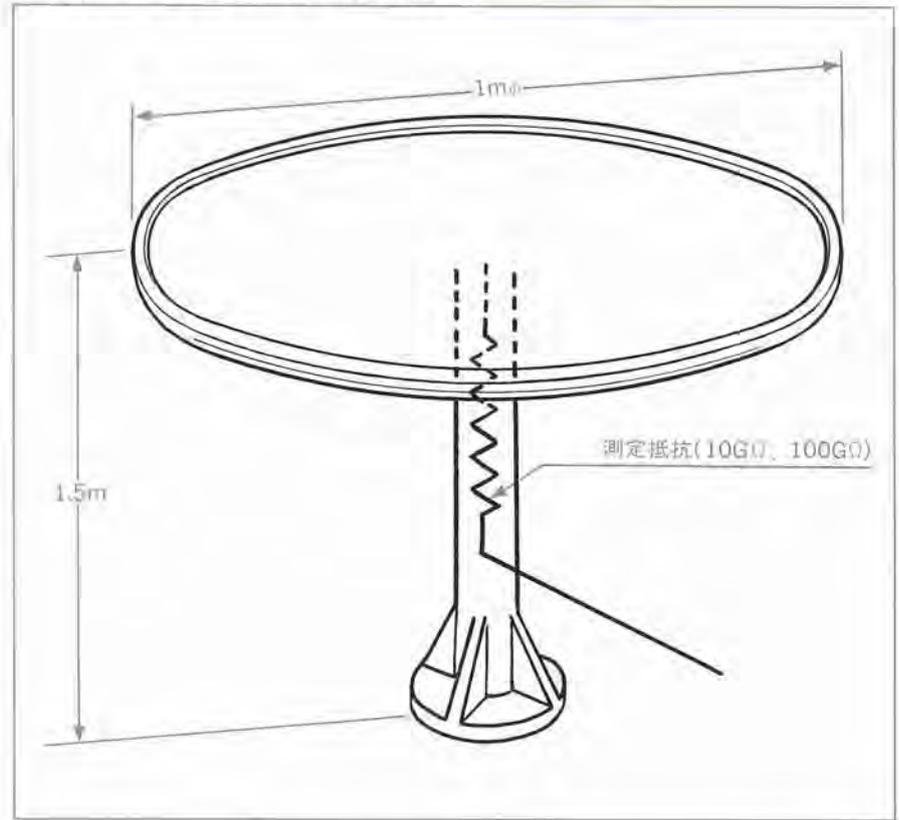
イオン流による帯電は次のような多種類の要素に複雑に影響される現象である。

1. 季節、気象：気温、湿度、風向、風速
2. 電線配置：電線の種類、高さ、間隔、組み合わせ(極性や回線数)、など
3. 電線の表面状態
4. 電圧
5. 帯電される物体の形、抵抗

当所では、早くからイオン流帯電の検討に着手し、直流試験線の下に標準円板を配置して、帯電電圧を調べてきた。標準円板は、直径1mの金属円板を高さ1.5mに保持したもので、この帯電電圧から人体や傘の帯電電圧を換算して求める(図3-3-2参照)。

帯電電圧の特性は、上のような多数の要

図3-3-2 イオン流帯電電圧測定用標準円板



素が複雑に影響しているが、現在まではほぼ次のことが分っている。

1. 同じ条件なら、負極性の電線の線下の方が正極性より帯電電圧が高い。
2. 湿度が高くなると、帯電電圧が増加する。
3. 送電線が高くなると、帯電電圧は低くなる。その関係は、高さの2~3乗に逆比例である。
4. 送電線に直角に(地面とは平行に)風が吹くと、帯電電圧は低くなることが多いが図3-3-3のように逆にかなり高くなることもある。
5. 同じ条件でも、測定場所が異なると帯電電圧が3倍も相違することがあり、電線表面の汚れの状態が違うためと考えられている。

これらの実測に対する理論解析は、イオン流帯電がイオンの発生、空間の移動、地表の物体への帯電、の三つに依存する複雑な現象であるため、まだ完全な計算法は完

成していない。しかし近似計算法ではあるが、イオンの移動については、

1. 静電界の方向にイオンが流れるとした計算法
2. 風を含めた有限要素法による解析法をそれぞれ開発している。特に前者は送電線表面のコロナ電流、地表物体の帯電電圧の計算まで組み入れた有用な計算法として、すでにイオン流帯電の予測に大きな力を発揮している。

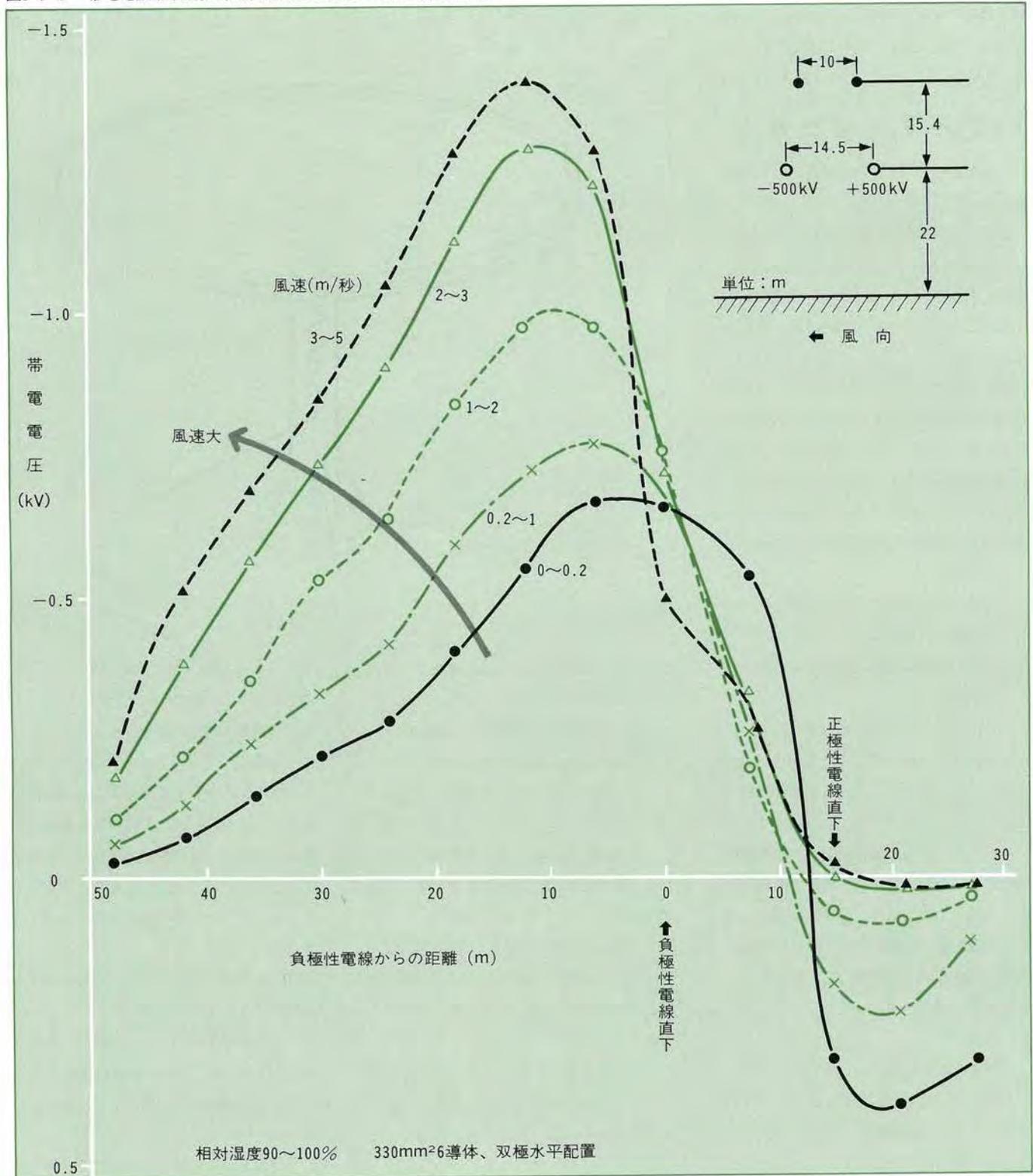
UHV 直流送電に関して、今後解明すべき課題には次のものがある。

1. 2回線配置(正負の送電線が2組ある場合)を中心に、UHV で想定される条件での帯電電圧特性：塩原 UHV 試験線による実測
2. 帯電される物体の形や抵抗の影響
3. 電線の表面状態や風の影響：一部塩原 UHV 試験線による実測

帯電ではないが、イオン密度などについても、将来、実施する予定である。

(宅間 董)

図3-3-3 帯電電圧(試験線と直角な方向の分布)に対する風の影響



### 3-3-3 ラジオ雑音

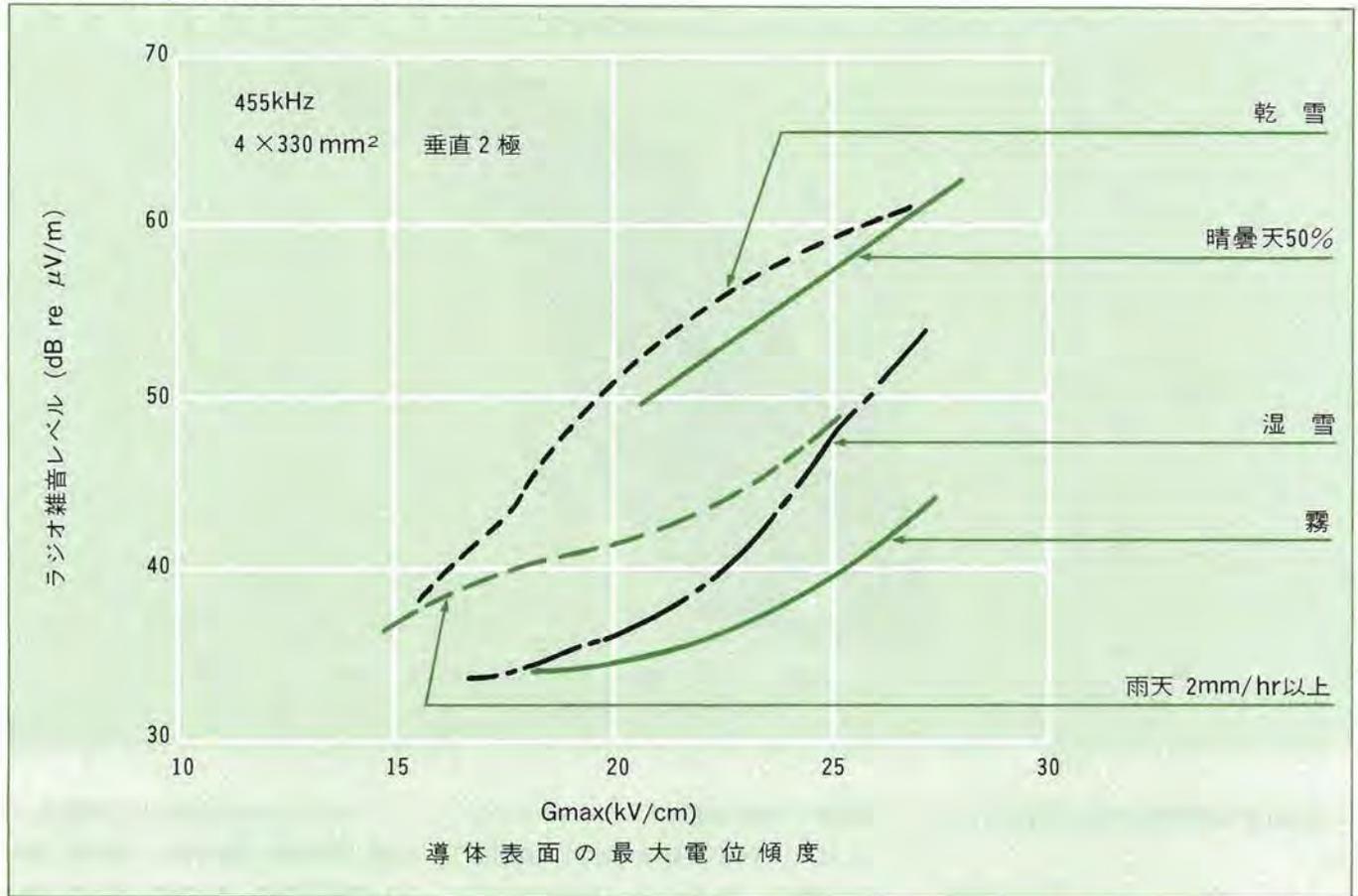
交流送電線からのラジオ雑音の研究は「2-3-3」で述べたように、既にかなり信

頼度の高い予測計算法も開発されている。しかし、直流送電線からのこのラジオ雑音に関する研究の歴史は浅く、未だ直流ラジオ雑音の大きさに関する適切な予測計算手

法は確立されていない。

当所では、この直流ラジオ雑音レベルの予測計算手法の開発を目的として、昭和46年以來、当所塩原実験場の実験送電線を用

図3-3-4 各天候時における直流ラジオ雑音特性



いて研究を進めて来ている。

本節ではこれまでの研究成果を、前述のように比較的的特性の解明が進んでいる交流ラジオ雑音と対比して紹介する。

まず、交流ラジオ雑音に対比して、直流ラジオ雑音特性の大きな特徴は、交流の場合その雑音の大きさは雨天時の方が、晴曇天時より20dB以上大きくなるのに対し、直流の場合、全くその逆になり、晴曇天時の方が雑音の大きさが大きくなる(図3-3-4参照)。

これは障害対策設計の面から非常に重要な問題である。すなわち、年間時間率1%値など送電線設計に必要なデータを把握するため、交流の場合、雨天時、特に強雨時の雑音の大きさが重要な意味をなす。これに対して直流の場合、晴曇天時の雑音の大きさが重要となってくる。

これまでのデータによれば、この直流ラジオ雑音の大きさと個々の気象要素(たと

えば気温、気圧、相対湿度など)との間に明白な相関は見出せないが、年間を通しての晴曇天時の直流ラジオ雑音の分布は、交流の場合と同様にはほぼ正規分布をなしており、その標準偏差は約3dBである。

よって、年間時間率1%値を求めるには平均の大きさに約9dBを加えるのが妥当であると考えられる。

この他の直流ラジオ雑音と交流ラジオ雑音との違いは、直流の場合、正極性導体の近くにある負極性導体の位置によって、その雑音の大きさが影響を受けることである。これは、交流送電線の場合、ある相の電圧は商用周波数で正、負電圧が交番するので、コロナ放電によって生じた空間イオンは自分の相の逆方向の電界によって次々と中和される。

しかし直流送電線の場合、この電圧の交番がないので、一担、電線表面で発生したイオンはゆっくり相手極もしくは大地へ流れ

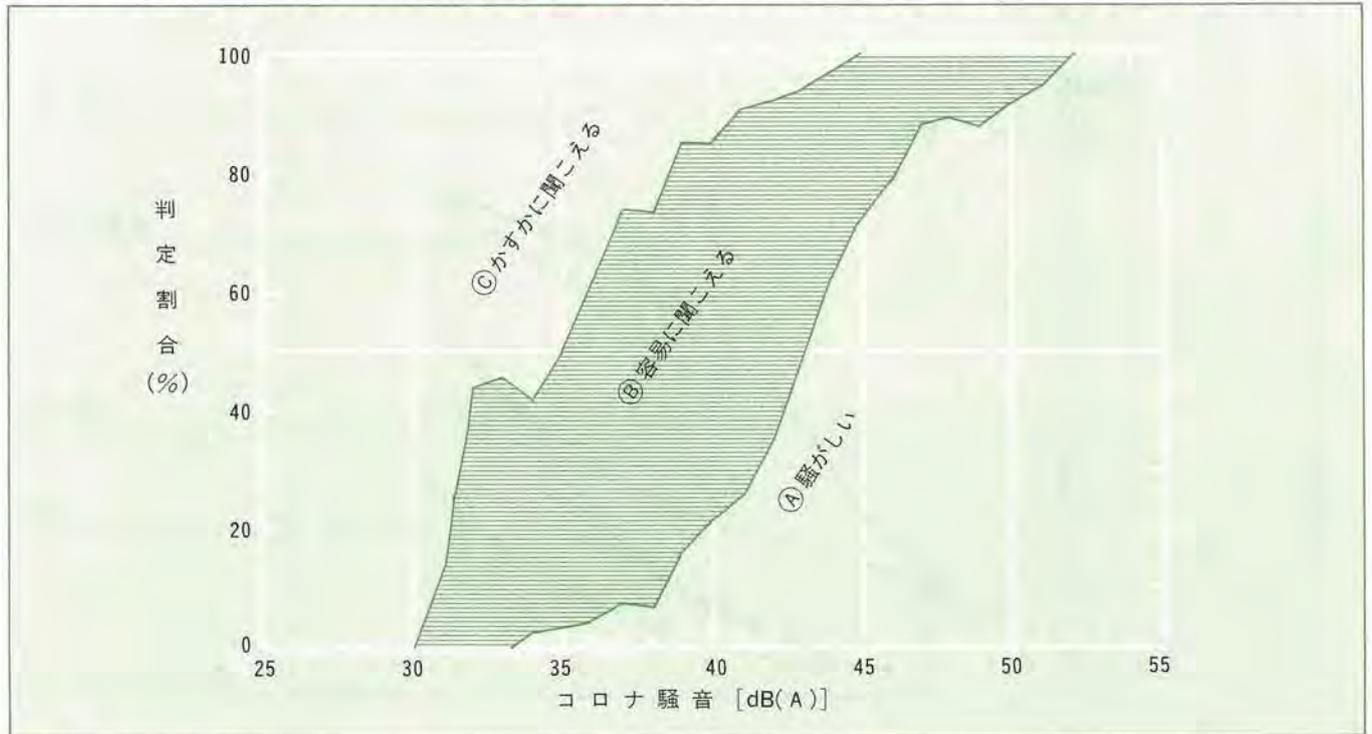
込み、その間、空間イオン雲を形成し、次に発生すべきコロナ放電に影響を与えるものと考えられているが、その詳細な機構については、未だ十分に解明はされていない。

また、交流ラジオ雑音の場合、Gmaxが等しい限り、素導体数に無関係であったが、直流ラジオ雑音の場合、その大きさが、素導体数によって異なるデータが得られている。これも本質的には前述の空間イオン雲の影響であろうと予測されている。

つまり、交流ラジオ雑音の場合、電線の種類、配置等多くのパラメーターをGmaxという1つの変数に帰着させて、その雑音の大きさを予測出来たのに対し、直流ラジオ雑音の場合、Gmaxだけではパラメーターが不足していることになる。

一方、我が国では、送電線用地の制限等から、直流送電線も2回線以上の装柱になることが予想され、ますますその極配列は複雑になり、直流ラジオ雑音の信頼度の高

図3-3-5 直流コロナ騒音の主観的評価結果(縦軸は、横軸のレベルのコロナ騒音を聞いた時、例えば、騒がしいと判定する確率を表す)



い予測計算手法の開発が強く要請されている。

そこで、当所では「3-5」のUHV塩原直流試験設備を用いて、この極配列の影響に関する精細なデータを収集し、あわせて気象条件等の影響も含めた、より信頼度の高い直流ラジオ雑音の大きさに関する予測計算手法の開発に努める予定である。

(笹野 隆生)

### 3-3-4 コロナ騒音

直流送電線の騒音としては、電線のコロナ放電によるコロナ騒音と、がいしの部分放電による騒音とに大別することができる。コロナ騒音は、交流の場合とは逆に、晴曇天時の方が降雨時よりも騒音レベルが高くなる。

晴曇天時には、雨音によるマスク効果がないこと、および、年間における晴曇天時の時間的割合が大きいかを考慮すると、騒音レベルが低くても障害となる可能性がある。このため、コロナ騒音レベルの予測手法と影響評価法の検討が重要と言えらる。

しかし、直流送電線のコロナ騒音は、気

象条件その他の影響によるバラツキが大きく、また、異極性の電線で発生する空間電荷の影響や、測定時における暗騒音による妨害などのため、その定量的特性は、我が国のみならず海外においても十分把握されていない。

さらにまた、直流送電線は建設実績が少なく、設計思想なども十分には固まっていないので、対象が広範である。

そこで、当所においては、昭和46年から塩原実験場において一連の実験を実施し、コロナ騒音レベルの概略的な予測法の開発と影響評価を行った。図3-3-5は、直流コロナ騒音の主観的評価結果で、コロナ騒音レベルが約43dBAを超過すると、「騒がしい」と判定する割合が50%を越えている。

一方、汚損したがいし連が霧などによって湿潤した場合にも、部分放電が発生して騒音が放射されることがある。特に、激しいインパルス音を伴う「部分せん絡(Single unit Flashover)」が発生する場合には、これによる騒音は、70dB(A)を越えることがあり、直流送電線の障害問題として特に重要となる可能性が大きい。

このため、±250kV級の人工汚損がいし連による各種の実験を行い、部分せん絡に伴う騒音の特性、発生条件、および、防止法を明らかにした。

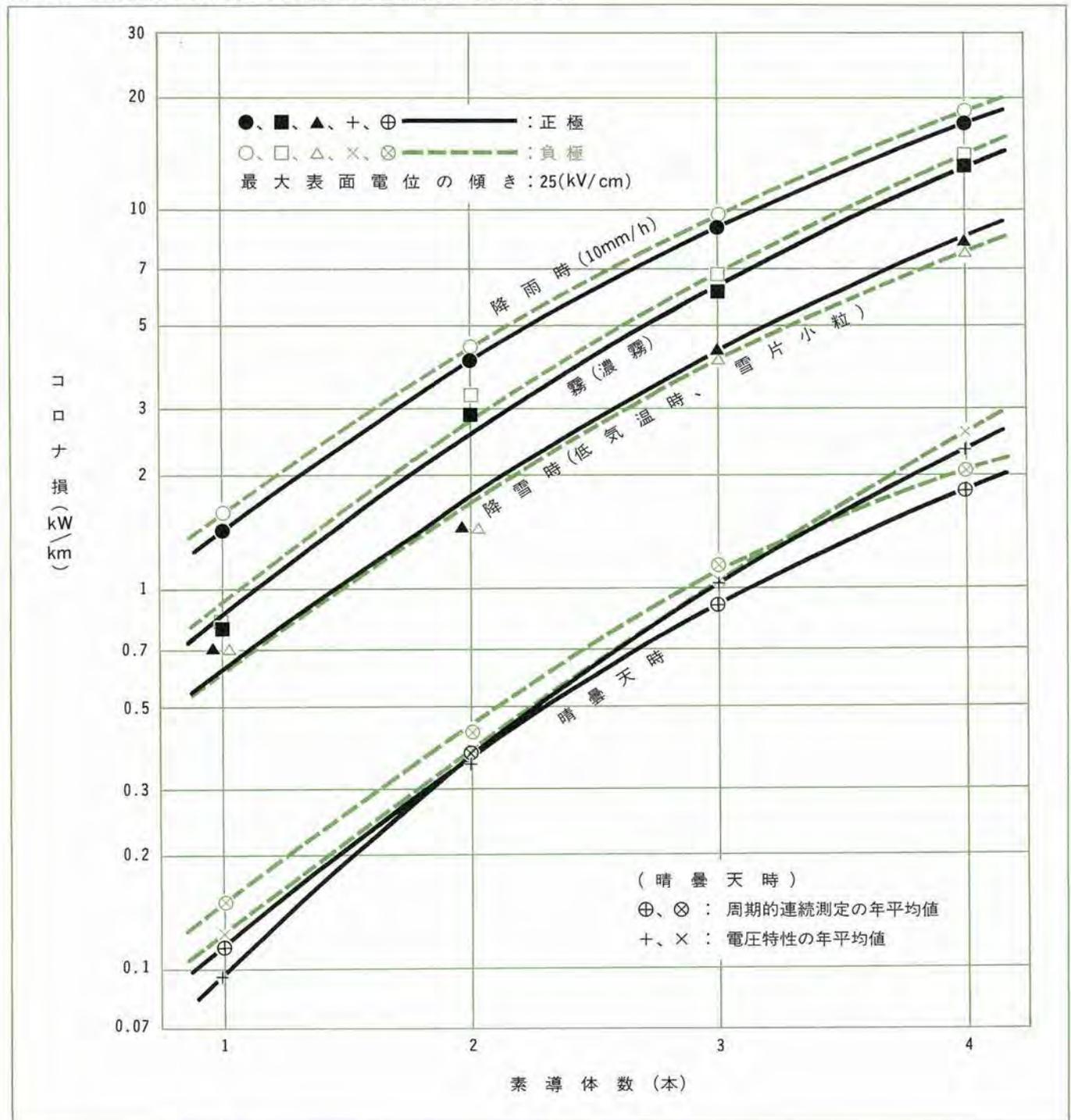
今後は、UHV塩原直流試験線による基礎研究を実施し、電線コロナ騒音の概略予測・評価法の適用範囲の拡大と精度向上を図り、また、UHV級がいし連の部分せん絡特性の把握と防止法の開発を行い、コロナ騒音障害防止対策を確立することを指向している。(福島 充男)

### 3-3-5 コロナ損

大電力長距離輸送のための直流送電線において、電線のコロナ損やがいし連の電力損は見すごすことのできない量であり、またイオン流帯電、ラジオ雑音特性の理論解析上最も基本的なパラメータである。

そこで、当所では昭和46年から直流送電線のコロナ損に関する実験的研究を行ってきた。これまで得られた成果のうち、気象条件とコロナ損との関係、素導体間隔の影響などについて述べる。

図3-3-6 気象条件、素导体数とコロナ損との関係(330mm 垂直双極充電)



### I. 気象条件とコロナ損との関係

コロナ損は気象条件の影響を受け、降雨、霧などによって导体表面が湿潤すると、正負両極ともコロナ損が増加する。各気象におけるコロナ損を比較すると、晴曇天、乾雪、霧、降雨時の順に大きく、しかもコロナ損の値は导体の湿潤度の高いほど大きい。

コロナ損と気象条件および素导体本数との関係を図3-3-6に示す。

素导体本数の増加とともにコロナ損も大きくなっているが、気象条件との関係は素导体数の影響を受けないことがわかる。また、降雨量10mm/Hにおけるコロナ損は晴曇天時のコロナ損の約10倍に達している。

降雨時のコロナ損は正極より負極の方が10~20%大きい傾向が認められる。

### II. 碍子の電力損

晴曇天時におけるがいし連の電力損(10連/km/相あたり)は晴曇天時のコロナ損の1%程度で、相対湿度が高くなると増加する傾向が認められる。降雨時においても電

力損はコロナ損の1%程度で非常に少ない。

### Ⅲ. 導体構成、線間距離と コロナ損との関係

コロナ損は導体表面の最大電位傾度( $G_{max}$ )の増加とともに大きくなり、しかも正極より負極の方が多少大きい傾向をもつ。

$G_{max}$ を一定として(図3-3-6参照)、各導体のコロナ損を比較すると、その大きさは素導体倍数以上となっている。換言すれば、素導体1本あたりのコロナ損は、素導体本数の増加とともに大きくなっている。

交流の場合には、素導体本数と無関係に1本あたりのコロナ損は一定であるのに対して、次第に大きくなっていく事実は、直流コロナ損の特徴である。

直流におけるコロナ現象は、空間電荷やイオン流の影響を大きく受けることは前述した。

異極導体が近づいたり、遠ざかったりすれば空間電圧が変化するので、放電状態もかわり、コロナ損も変化することになる。すなわち、コロナ損は線間距離によって変化する。

コロナ損は線間距離が減少するにつれて単極の場合よりも著しく増加し、しかも増加の程度は $G_{max}$ の大きいほど大きくなっている。

多導体電線で素導体間隔のコロナ損に及ぼす影響を実験的に検討したところ、素導体間隔またはその配置によって各素導体のコロナ損の大きさは増減する。しかし、導体全体のコロナ損を同一 $G_{max}$ の条件で比較すると、素導体間隔が20cm以上では標準間隔の場合と殆んど相違しない結果を得た。

(杉本 勉)

## 3-3-6 生物への影響

### I. 人体・動物への影響

直流電界の影響については、海外でも研究が行われている。

米国においてはBPA(米国内務省ボンネビル電力庁)が建設した $\pm 400\text{kV}$ 送電線下の動物生態調査が行われたが、直流電界の影響は認められていない。

実験的研究としては、微弱な直流電界が

動物の呼吸や、代謝活動の活性を高めることが知られており、医療への応用研究が進められている。送電線下では直流電界以外に陰陽両イオンの発生があり、それらの複合的影響を検討しなければならない。

当所においては北海道大学と共同研究で、マウス、ネコを使用した課電実験を実施している。現段階では直流電界のみの影響を検討しているが、イオン流との複合の影響について研究を推進する予定である。

直流電界ではケージ中の動物を一定の電界に暴露するために、特に図3-3-7に示すようなカップ状の金属ケージを使用する必要がある。この方法を共同研究の中で開発した。現在、オゾンが発生しないようにしてイオン流を発生、制御する装置の研究を実施中である。

現在、米国においてもこの研究のための実験装置の研究が進行中であり、近い将来直流電界の影響については、交流電界に代って、活発に検討されるようになるものと予測される。

### II. 植物への影響

直流線下の植物に対する影響について、当所において、地上9mに電線を架線し、直流 $\pm 200\text{kV}$ を印加し(地表面電界強度約 $100\text{V/cm}$ )、その線下にイネ、コムギ、トウモロコシの栽培試験を行ってきたが、送電線のない所(対照)と比較して生育差がほとんど認められない。

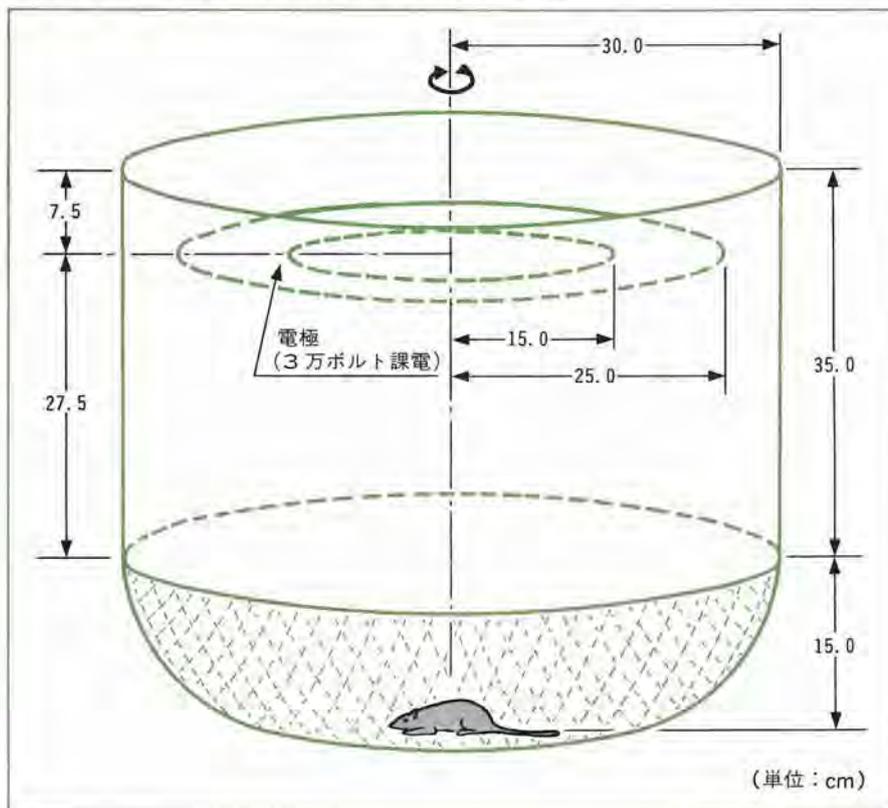
内外の文献によると、実験的には、 $1,000\text{V/cm}$ 以上の電界強度で、葉の損傷、生育への影響が報告されているが、 $100\sim 500\text{V/cm}$ では影響がなく、むしろ、生育が促進される例がみられる。

直流の場合は、電界、イオン流が複合されているので、電界の影響を直接とらえる事が難しいが、 $100\text{V/cm}$ のような低い電界下では、植物に対する影響が考え難く、むしろ、生育刺激のような作用がある。

いずれにしても、これらの点については今後、さらに実験、検討を行う予定である。

(藤原 喬)●

図3-3-7 電界暴露用のカップ状ステンレスケージの略図



## 3-4 運用制御

担当●電力技術研究所 電力システム部 部長 町田 武彦

### 3-4-1 緒論と結論

本章では、大電力直流送電技術の中で重要な課題である運用制御に関する主なる研究成果を述べる。これらを要約すると次の通りである。

1. 原子力電源を直流双極2回線で送電する場合、一線地絡では安定運転が確保でき、二線地絡時は他の健全な直流線路への自動切換か、故障線路を約0.5秒以内で再起動すれば安定であることがわかった。
2. UHV 交流と直流の並列系統のモデルでの最大可能な送電電力は交流線路より直流線路に2倍だけ電力分担させた時であり、UHV 交流送電方式よりも送電可能電力は大きい。

3. 串型交流系統で小系統から大系統への送電電力を増加させる方式として、直流による系統分割があり、系統モデルによっては送電電力が最大となる分割地点が存在する。

4. UHV 交流と直流3端子の並列系統のモデルで、これまで開発してきた直流多端子集中制御方式が性能よく動作することを検証した。

5. 交流系事故による交流電圧低下で直流送電系の停止と再起動する時間を短縮するため、変換所のサイリスタバルブに必要なゲートパルスを停止させない方式を開発し、直流単独送電や交直連系統の安定運転の向上に役立つことを示した。

これらの課題は、さらに詳細な実験的な

機能検証が必要であり、昭和57年度に完成する直流電力系統シミュレータで十分な実証試験を実施していくことにしている。

(町田 武彦)

### 3-4-2 原子力発電所からの直流単独送電

将来の我が国における直流送電の適用分野として、原子力大電源基地からの長距離大電力送電が予想される。これは、直流送電線の建設費が少なく済み、また、交流送電線のような安定度による送電容量限界がないからである。

しかし、これを実用化するためには直流送電線や交直変換所、直流系と接続する受電側交流系統において、事故が発生した時の現象や、原子力発電所に与える影響を把握しておくことが必要である。

当所では、その第1ステップとして原子力発電所の全出力を直流送電線のみで送電する直流単独送電システムを想定し、そのシステムに事故が発生した場合の原子力発電プラントや直流系統の動作特性の解明と原子力発電プラントへ及ぼす影響と軽減対策を検討している。

解析の対象とした系統モデルは図3-4-1を用い原子力発電所の出力は1,000万kW、送電巨長は約600kmで直流2回線方式とした。原子力発電所は沸騰水型(BWR)と加圧水型(PWR)の2つの型をそれぞれ検討した。

想定した事故としては、事故のうちでは確率的に多いと予想される直流送電線の地絡故障(図3-4-1参照)と、交直変換所に対して大きな影響を与える受電交流系統の送変換所近傍の地絡故障とした。

図3-4-1 想定した直流単独送電系統(2回線)と仮定の事故発生地点

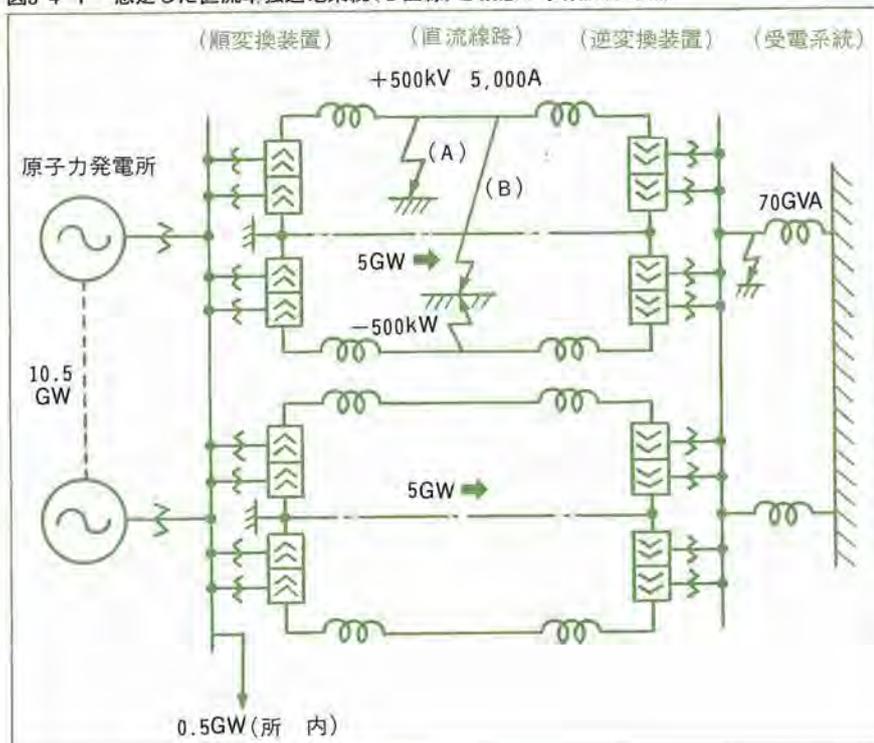
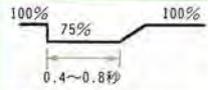
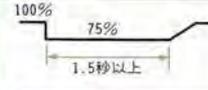
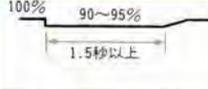
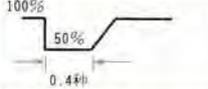
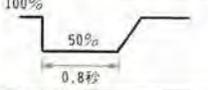
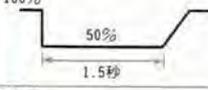
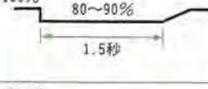


表3-4-1 系統事故における原子力発電所運転続行の可能性と直流電力制御の効果  
(BWR 原子力発電所の場合 バイパス弁容量=25%)

故障の種類		故障時の発電機出力変化	健全直流電力の増加量	原子力発電所の運転続行可能性	スクラム防止対策
直流送電線の事故	1線故障 (1/2回線故障) (A点)	瞬時故障 	0	○	必要なし
		永続的な故障 	0	△	●健全直流電力の一時的増加
	永続的な故障 	20%	○		
	2線故障 (1回線故障) (B点)	瞬時故障 	0	○	必要なし
		瞬時故障 	0	△	●健全直流電力の一時的増加
		瞬時故障 	60%	△	
2線故障 (2回線故障) (B点)	永続的な故障 	0	△	●健全直流電力の一時的増加 ●発電機の出力急減 ●バイパス弁容量の増加	
	永続的な故障 	80	○		
交流送電線の事故	逆変換所近くの交流送電線 1回線故障		0	△	●直流系の高速自動復旧方式
			0	○	

### I. BWR 発電所からの直流単独送電

直流線路および交流線路に故障が発生したときに、その影響でBWR 発電所が運転継続できるかどうかの解析結果の1例を表3-4-1に示す。ただし、原子力発電所のバイパス弁の容量は25%の場合である。

同表からも明らかなように、発生確率が多いと考えられる直流送電線の1線地絡故障に対しては、直流系で用いている通常の保護システムによっても原子力発電所は安定な運転を継続できるものと推定される。

直流送電線の2線地絡故障はほとんど発

生しないものと考えられるが、この事故が発生すると直流電力は約50%に減少するので、故障期間が約0.5秒以上に長くなると原子力発電プラントに悪影響を与え、場合によっては、原子力発電プラントが停止する恐れもある。

これを防止するためには事故の発生していない健全な直流システムの電力を一時的に増加するか、または発電機の出力を一時的に急減する必要がある。

逆変換所近傍の交流送電線で事故が発生した場合には従来の保護システムを用いる

と直流系統は約0.5秒間送電を停止するので、何の対策もほどこさなければ原子力発電所はスクラムする可能性が高い。

しかし、これについても当所で既に開発した直流系の高速自動復旧方式を用いれば、上記の停止期間を約0.1~0.12秒に短縮できるのでスクラムを回避することができることが判明した。

### II. PWR 発電所からの直流単独送電

PWR 発電所の場合もBWR 発電所とはほとんど同様の結果を得た。すなわち、直流送電線の瞬時的な1線地絡故障に対しては原子力発電所はほとんど支障なく運転を継続するものと推定される。

また、永続的な1線地絡故障に対しては、健全な直流電力を約10%増加すれば運転継続が可能と考えられる。

直流線路の2線地絡事故に対しては直流系の再起動時間が約0.5秒以内であれば安定な運転継続が可能である。非常に稀な場合であるが、2線地絡事故が永続的に継続する場合は健全直流系の電力を10~40%近く増加する必要がある。

逆変換所近傍の交流系事故に対しては、高速自動復旧方式を用いることにより安定な運転を継続できる。

### III. 原子力・直流単独送電の起動・停止方式

原子力電源からの直流単独送電の場合には交流送電のように発電機の回転数や周波数が自動的に受電交流系に近づいてくる機能(これを同期化力という)がないため、発電機への機械的入力と直流送電の送電電力とを常にバランスをとりつつ運転を行う必要がある。とくに、原子力発電プラントの起動・停止時には、プラントの出力変化条件の制約や交直変換装置が運転できる最小電力のかね合いでプラントに対して悪影響を与える可能性もあるので、原子力プラント出力と直流送電電力とのバランスを常にとりながら直流系を起動あるいは停止する必要がある。

## 1. 起 動 方 式

原子力直流単独送電の起動時には原子力プラントおよび直流系の下記の制約条件を満足しつつ起動する必要がある。

- (i) 原子力プラントを停止状態から起動する場合、蒸気系を主としたプラントの安定性維持の面から、最初に運転する出力は5%以内にするのが好ましく、また、タービンの熱応力の面から、この状態を2時間程度保持する必要がある。
- (ii) 一方、従来の直流送電では、交直変換装置に付属する過電圧抑制回路の熱容量の制約から、最小電力(直流定格電力の5～10%)以下で運転する時間は、約1秒程度以内とする必要がある。

これらの制約のため、従来の直流送電系統では起動初期におけるプラント出力と直流電力のバランスをとることは困難となる場合が予想される。

この問題を解決するため、従来の起動方法とは異なり直流系の最小電力を小さくしてプラントの初期運転出力を許容範囲におさめできるだけプラントへ与える影響を小

さくする低力率運転による起動方法を提案した。

この起動方法は、従来方式にくらべて、長時間直流電圧を低くして低力率運転で直流系を起動する方式であり、その手順はつぎの通りである。

- (i) プラント立上げ出力の大きさに応じて直流系を最小電流、低電圧(低力率)で起動する。
- (ii) プラントの出力上昇に応じて、直流電流は最小のまま直流電圧を上昇し、直流電力を立上げていく。
- (iii) 直流電圧が定格値となったのち、直流電流をプラント出力上昇に応じて立ち上げる。

この起動方式の採用にあたっては、交直変換装置の低力率運転時間を長くとる必要があるため、変換器の過電圧抑制回路の熱容量を従来方式のものにくらべて大きくする必要がある。

## 2. 停 止 方 式

停止方法は起動方法とまったく逆の手順により可能となる。すなわち、原子力発電プラントの出力低下に応じて直流電流を下

げていき、最小電流となった後、直流電圧をプラント出力に応じて下げて後、停止する。

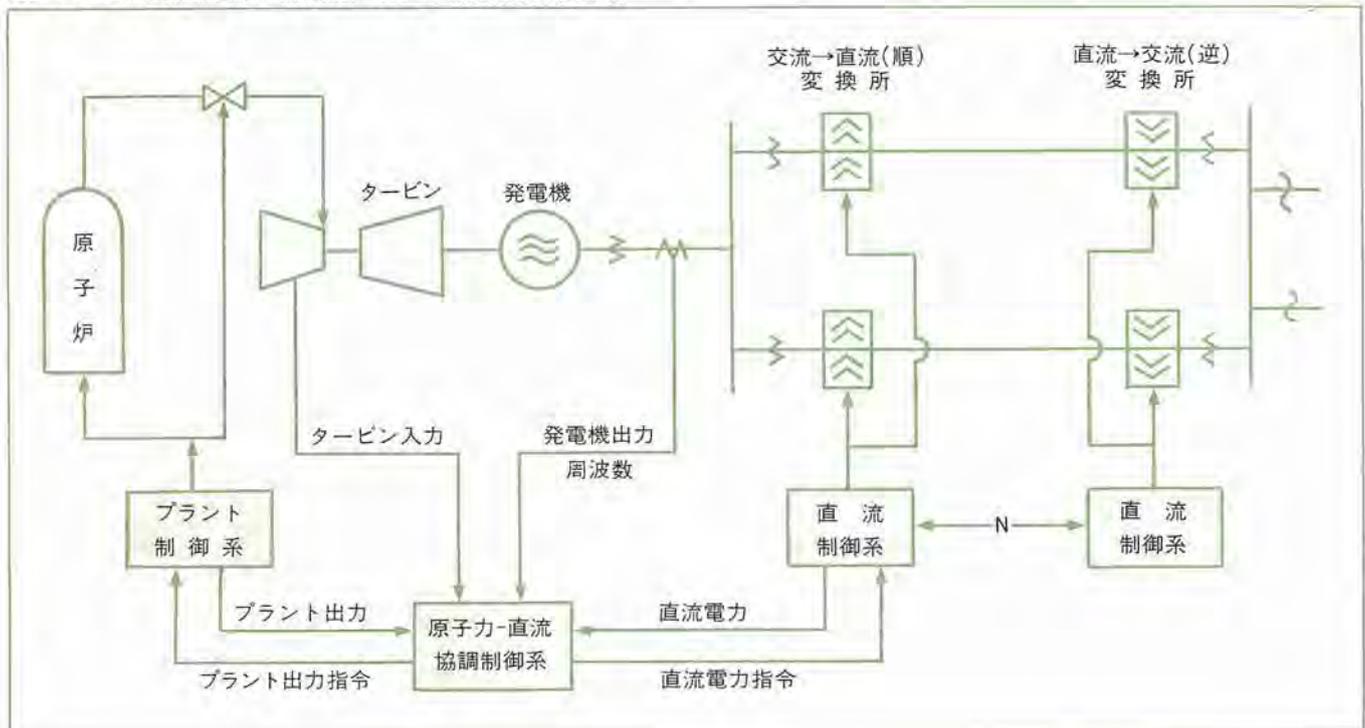
## IV. 原子力発電所と 直流送電系統との協調制御方式

直流単独送電系統においては、定常運転時および事故発生時などタービン発電機の回転数を極力一定に維持するため、発電機への機械入力と直流送電系の送電電力とが常にバランスさせることが必要であり、原子力発電プラントと直流系との協調制御が必要である。

原子力発電機の応答速度は、0.5%/秒であるのに対し、直流系の応答速度は100%/数百msであり、はるかに速いので、直流電力を制御して発電機の機械的入力に追従させる方式がよいと考えられる。

協調制御方式の一例を図3-4-2に示す。同図に示すように原子力発電所からタービンの機械的入力や発電機の出力、周波数、直流系統からは直流電力などを検出して常に発電機の回転数や周波数変動を許容の範囲内におさめるように適切なプラント出力と直流電力を計算し、その指令をプラント制

図3-4-2 原子力直流単独送電系統における協調制御方式の1例



御系と直流制御系に与えるものである。

(町田 武彦)

### 3-4-3 交直並列送電システムの最大送電電力と安定度向上対策

遠隔地の電源基地から大電力を送電する方法としては、交流送電のみによる方法、直流送電のみによる方法(直流単独送電)、交流送電と直流送電の両方を並列して送電する方法(交直並列送電)がある。

交直並列送電は交流システムの系統構成や同期化力による運転面の融通性と、直流送電の経済性や系統安定度問題がないという、両者の長所を生かした送電方法である。

以下に、UHV級交直並列送電システムモデルを想定し、送電可能電力と、最大送電電力を得るための交流系と直流系の電力分担比と直流送電系統の特徴である高速な電力制御性能を利用した系統事故時の過渡安定度向上方式について記す。

#### I. 交直並列送電システムの送電可能電力

今回対象とした交直並列送電システムは、図3-4-3に示すように、複数台の発電機からUHV級交流送電線(約500km)とUHV級直流送電線(約800km)とにより、1,000~1,500万kWの電力を受電系統へ送る長距離大電力送電システムである。この場合の受電系統の容量は約7,000万kVAであり、受電系統に対

図3-4-3 想定した UHV 交流・直流並列送電系統

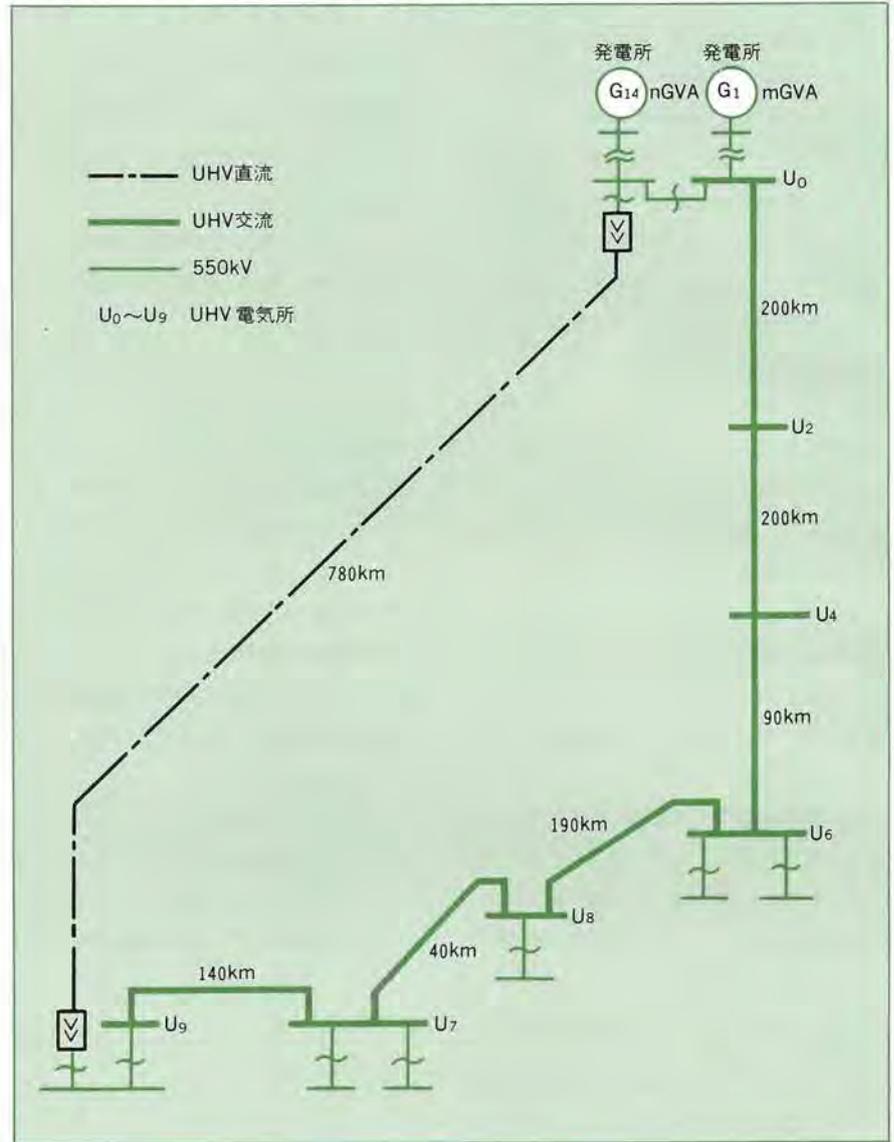
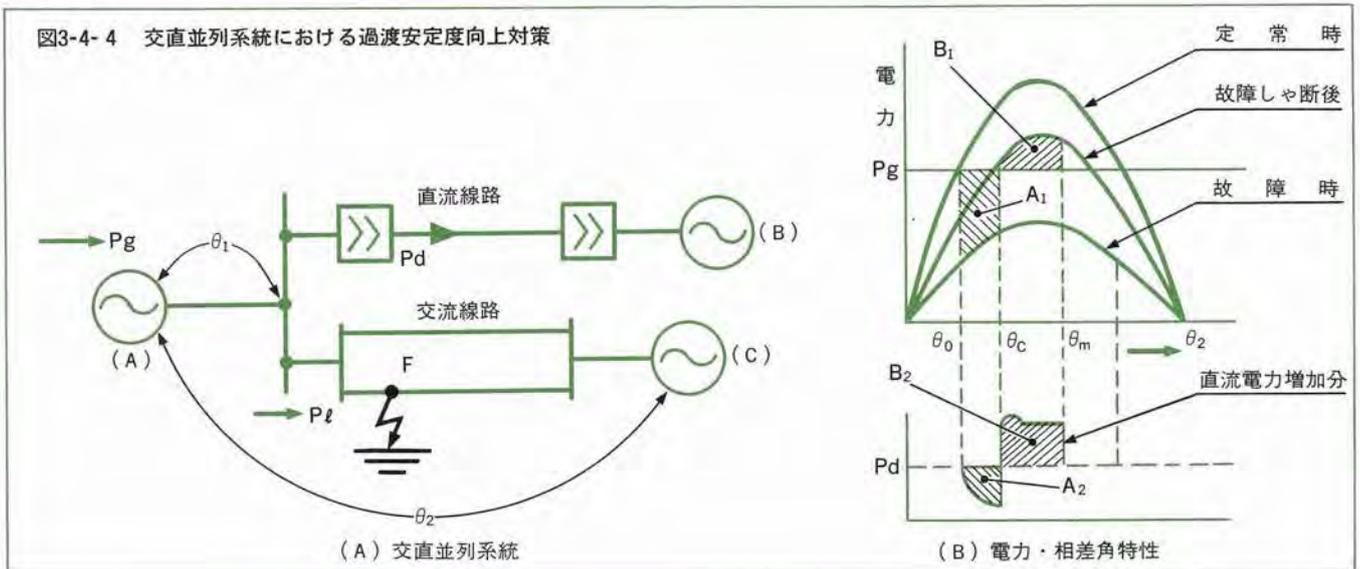


図3-4-4 交直並列系統における過渡安定度向上対策



して15~20%にあたる電力を送電する系統である。発電機の定格出力は110万kWと仮定している。

この系統でUHV交流送電線やUHV直流送電線に、万一事故が発生した場合に、送電できる最大電力および交流と直流との適切な送電電力の比率を検討している。

仮定した事故としては、UHV交流送電線の1線地絡故障とUHV級直流送電線の1線地絡故障である。

モデル系統による検討の結果、送電可能電力は1,600万kWであり、この場合の交流側電源は5台(550万kW)と直流側電源は10台(1,100万kW)となり、交流送電電力と直流送電電力との割合は1:2が適切であることが判明した。

なお、同上の分担比で1,000万kW送電している場合、確率的にはめったに発生しないと予想されるがさらに厳しい事故のUHV交流送電線における1回線の3線地絡故障、UHV直流送電線における1回線の永続的な2線地絡故障について検討した結果も、十分安定であることを確認した。

## II. 直流電力制御による過渡安定度向上対策

運用制御面からの直流送電系統の特色は、交流送電に比べて潮流変化速度が極めて早く、かつ電力の調整幅を自由に調整することができるということである。

その潮流変化の速さは、停止の状態から定格電力まで制御するのに0.2~0.3秒程度である。したがって、この迅速な潮流制御能力を活用すれば、事故が発生した場合の過渡安定度の向上や、電力動揺の抑制に効果をあげることができる。

すなわち、図3-4-4の交直並列送電系統で、事故により生じた発電機の加速または減速エネルギーを、急速な直流電力の制御により吸収することができる。

例えば、同図のF点で交流線路の故障が発生した場合、故障回路の遮断後、直ちに直流電力を一定期間だけ増加すれば電源発電機の脱調は防止でき、過渡安定度は向上

図3-4-5 串型交流系統の直流分割

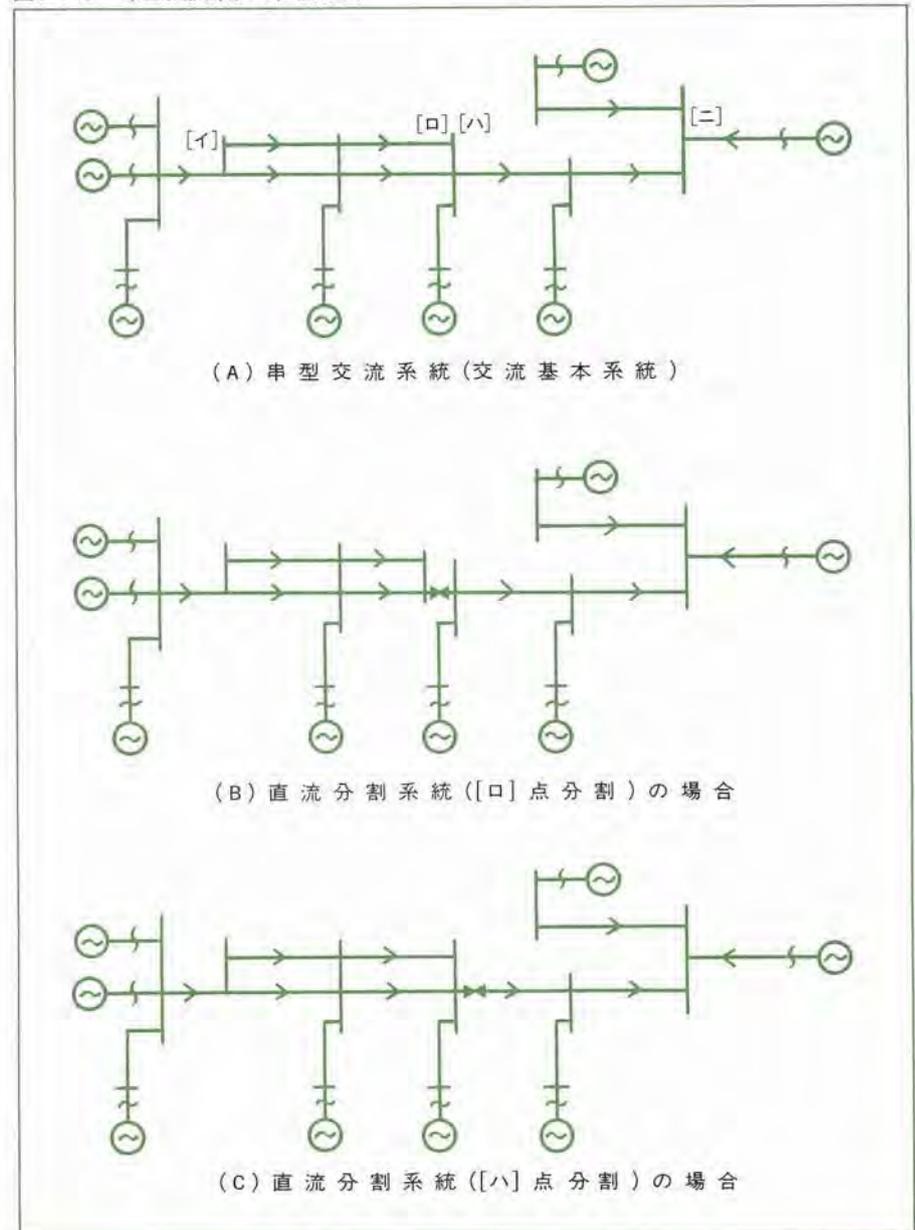
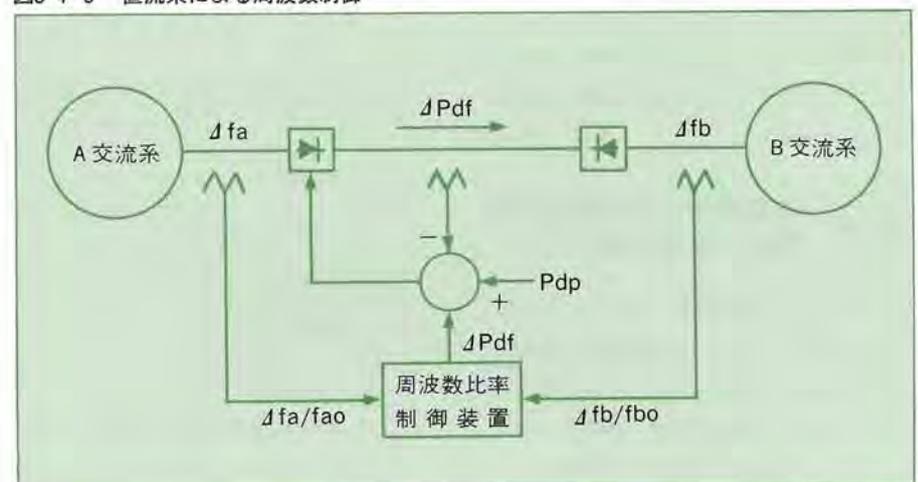


図3-4-6 直流系による周波数制御



する。

さらに、直流電力を一定期間増加するだけでなく、発電機の動揺特性に応じて直流電力を増減すれば、電力動揺を急速に抑制することができる。(町田 武彦)

### 3-4-4 交流系統の直流分割による送電電力向上効果

いくつかの交流系統を直列でかつ串状に連系する図3-4-5のような串型系統では、主幹送電線が長距離となり、事故の発生により一つの電源が不安定になると、これが引金となり主幹送電線の電圧が異常に低下して、系統全体が不安定となることも予想される。このため、串型系統の各交流系統間の融通電力を低く抑えざるを得ないこともある。

このような串型系統を、同図のように直流系により分割すれば、系統間の融通電力特に、小系統から大系統への送電電力を増大することができる。

想定した系統を(i)~(iv)の各点で直流分割した場合を、各々検討した結果、対象とした系統では、直流分割による送電可能電力は基本交流系統にくらべ、1.2~1.5倍増加することが判明した。この送電可能電力は、直流分割地点によって異なるが、系統の電気的中心近くで直流分割することが最も効果的である。

さらに、この直流系統に図3-4-6に示す直流系による周波数制御方式を備えることにより、事故時の周波数変動を小さく抑えることができる。この方式は直流系により分割された2つの交流系統の周波数を検出して、この信号に応じて直流電力を制御するものである。(町田 武彦)

### 3-4-5 交直並列多端子送電の制御・保護方式

直流多端子送電が必要となるケースとしては、図3-4-7に示す3通りが考えられる。

1. いくつかの電源から電力を集めて大電力送電する場合(図3-4-7(A))
2. いくつかの交流系統を非同期連系する

図3-4-7 直流多端子送電の適用ケース

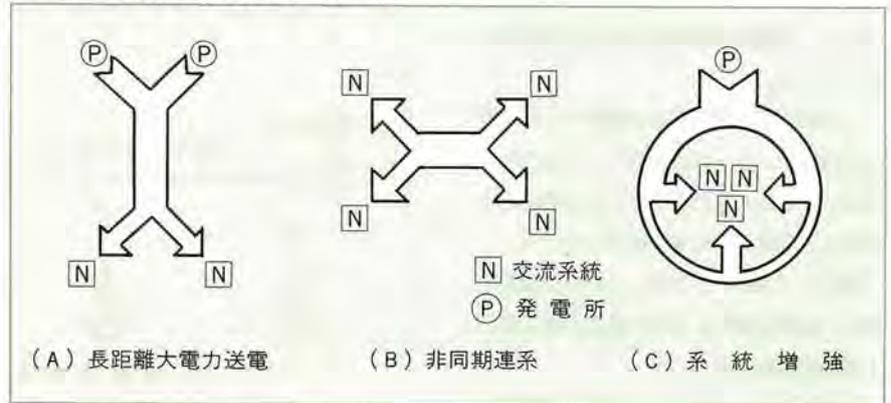
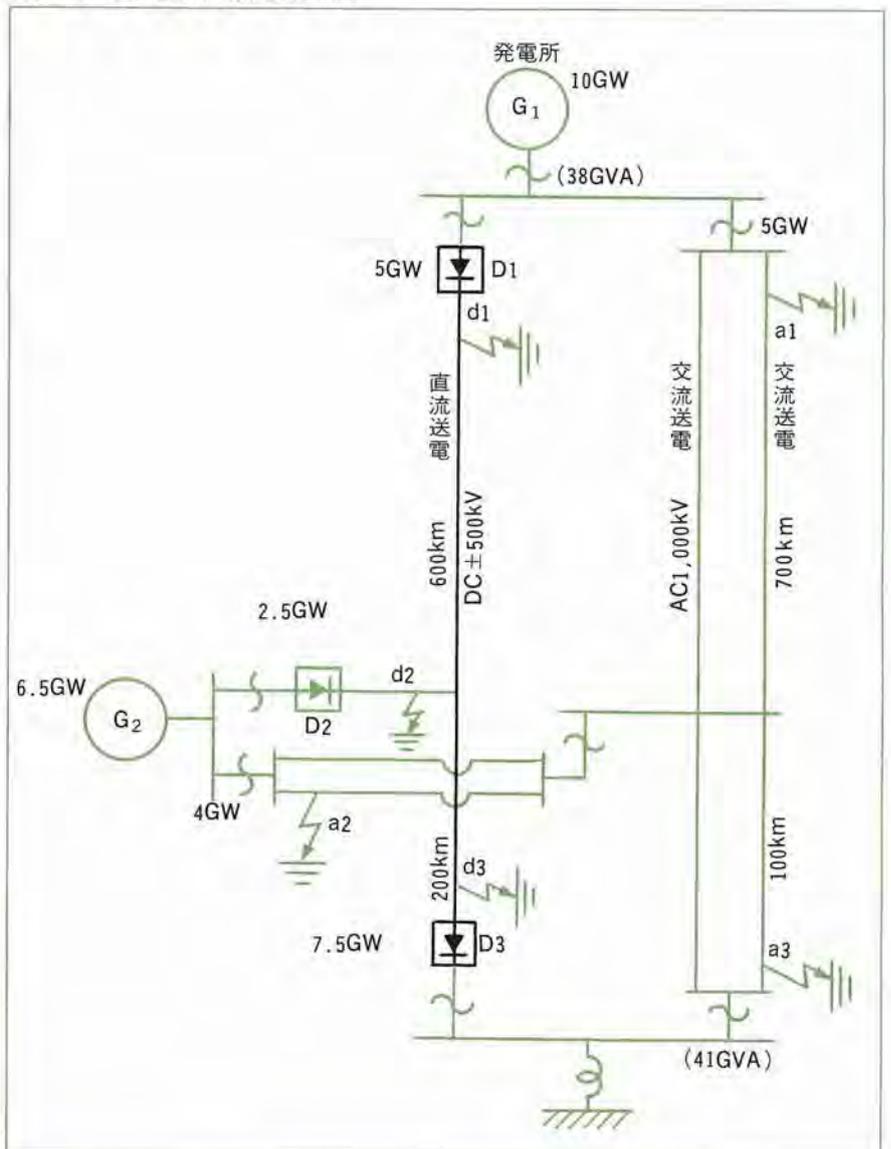


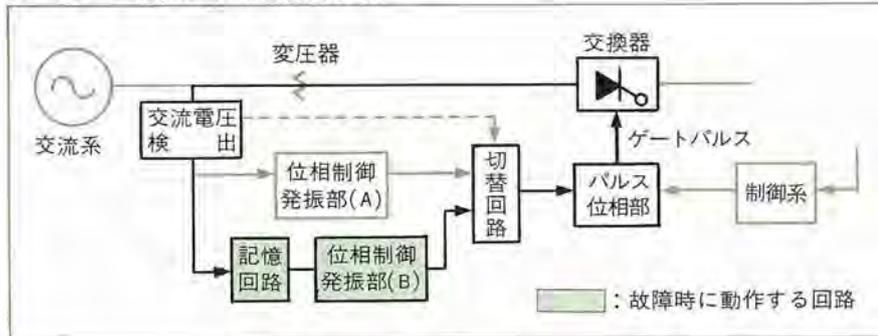
図3-4-8 交直並列3端子送電モデル



- 場合(同図(B))
3. 一つの大電源から複数の地点へ電力を配分する場合(同図(C))

これらの直流多端子送電を実用化するため、信頼性の高い制御、保護方式の開発が望まれており、そのための基本的な制御方

図3-4-9 直流系の高速自動復旧方式



式、起動、停止方式、事故発生時の基本的な保護方式ならびに各変換所を集中監視制御するための集中制御方式は、既に開発している。

さらに、大電力を長距離送電する場合に、図3-4-8に示すように、交流送電系統と直流多端子送電系統の並列送電系統も考えられ、この系統について交流送電線や直流送電線で事故が発生した場合の影響とその波及をできるだけ小さくするための制御、保護方式を検討しておく必要がある。

想定したモデル系統において交流送電線に故障が発生した場合には、事故点に近い変換所だけでなく、遠方の変換所も故障期間中は影響を受けるが、適切な保護を行えば、その影響を極力小さくすることができることを明らかとし、保護方式を開発した。

さらに、直流系の高速自動復旧方式を用いれば交流線路の瞬時的な故障に対しては、直流多端子系統の特別な保護操作は必要とせず事故しゃ断後、直ちに安定な運転に入ることができる。

このため、前述の保護方式は、故障が永続的に続いた場合にのみ必要となる。

直流送電線の事故に対しては、先に開発した保護方式により、故障極のみが一時的に停止するが、その影響は、交流線路の故障よりもかなり小さい。

これらの検討により、直流多端子系統の基本的な制御・保護方式は確立したものと考えられ、今後は情報伝送系や集中制御装置に異常をきたした場合でも、安定に運転を継続できる高信頼度の制御方式の開発を進めていく予定である。(町田 武彦)

### 3-4-6 直流送電の運動能力向上方式

#### 1. 交流系事故時の直流系高速自動復旧方式

交流送電系統では事故が発生すると、事故除去後直ちに電力の送電が可能であるが、現状の直流送電系統では、交直変換電と接続する交流系統の電圧が定格値の約50%以下に低下すると直流送電系統を一時的に停止し、故障除去後再起動する方式をとっており、この停止時間は通常の系統では約300~500msである。

これは交流電圧が大幅に低下すると交直変換装置に制御信号を与えるパルス位相器の動作が不安定となり、過電圧の発生や、変換装置の正常な運転ができなくなるためである。

このように大幅な交流電圧低下時に数百ミリ秒の間停止することは、直流送電を基幹系統に適用する場合に、信頼性の面で劣ることになる。

そこで、当所では交流電圧が異常低下した場合にも直流系を停止することなく、電圧回復後、直ちに送電可能な方式を既に開発した。

この高速自動復旧方式は図3-4-9に示すように従来から交直変換装置に用いている位相制御発振部(A)と並列に、記憶機能を持った位相制御発振部(B)を、追加したものである。定常運転時は、交直変換装置は(A)のループにより動作し、故障により交流電圧が大幅に低下すると(B)のループに切替えて運転する。

これにより、交流電圧の大幅な低下また

は消失時にも事故直前のパルス同期信号を記憶し、故障期間中でも適正な変換器点弧パルスを継続できるので、交流電圧回復後直ちに直流系は正常運転に入り、電力を送電することが可能である。

この方式は交直並列送電系統のみならず、直流単独送電系統や系統間直流連系にも有効である。

#### II. 交流電圧安定度と向上対策

直流送電系統を導入する場合、これと連系する交流系統がある程度以上大きくないと、交直連系点の電圧が低下して、安定な運転ができなくなる場合がある。この現象は交直連系系統の電圧不安定現象と呼ばれている。

交直系統の大きさを示す度合としては、交直連系点からみた短絡容量が用いられている。直流系を安定に運転するためには直流系容量の4~5倍の短絡容量が必要とされ、3倍以下の場合にはそれぞれの系統に応じて直流系の制御方式や調相設備などを詳細に検討して対処する必要がある。

この電圧不安定現象は交流系と直流系の相互干渉により発生するもので、大電力を直流系で受電交流系統へ送り込む場合には、十分検討しておく必要がある。

この電圧安定性を向上させる対策としては、交直連系点にサイリスタを利用した静止型電圧調整装置や、同期調相機を設ける方法がある。

このうち、静止型電圧調整装置は大容量化が容易なこと、速応性がよいこと、保守管理が容易なことなどの点から有望視されている。

直流系起動時における静止型電圧調整装置の効果を解析した結果、この静止型電圧調整装置に上記のような定常運転時のみではなく、直流送電線や交流送電線に事故が発生した場合の過渡的な電圧安定性の向上や、過電圧の防止に有効であることを明らかとした。今後は直流電力シミュレータにより更に機能検証を行う予定である。

(町田 武彦)●

## 3-5 試験送電線と関連設備

担当●電力技術研究所 特任研究員 坂本 雄吉

### 3-5-1 緒論と結論

我が国の高電圧直流(以下 HVDC と書く)送電の研究は、電源開発株式会社によって北海道本州連系線が計画されて以来本格化し、主として±250kVについて当所でも絶縁、障害関係を中心に研究を行ってきた。しかし HVDC による架空送電は、国際的にも、未だ交流に比べて実施例が格段に少なく、経験も積まれておらず、特に±300kV以上では明らかになっていない点が多い。

特に障害防止対策の確立には、電力線から発するコロナに起因するコロナ騒音、ラジオ・テレビ障害、イオン流帯電現象などの性状を正確に把握する必要があるが、HVDC では、電力線からの空間電荷が导体表面の真の電位の傾きに影響し、この空間電荷は風などの気象条件によって変化するので、コロナ現象は不安定で、交流のように、导体構成、导体配列、地上高から計算した静的な导体表面の電位の傾きの関数として、現象を表わすことが困難である。

1例を挙げると、交流では导体構成とその静的な导体表面の電位の傾きが同じであれば、コロナ現象は同じであるのに対して、HVDC ではこれが同じであっても、極間間隔、地上高の関係が異なれば空間電荷の挙動が異なり、真の导体表面電位の傾き(動的な電位の傾きと呼ぶ)が変化しコロナ現象も変わってくる。

また、このような理由で、交流の静電誘導に相当する線下地上物体への帯電現象であるイオン流帯電現象も気象条件に大きく影響され、帯電電圧は時間とともに大きく変動する。

以上のように HVDC の現象は、空間電

荷の挙動により交流とは大きく異なり、本格的な研究開始後の日が浅いため、まだ十分な解明がなされているとは云い難い現状にある。

他方、これまでの成果によると、UHV 直流送電は、少なくとも線路のみに限ってみれば、交流と比較して安定度による制約がなく、また、同じ大電力を長距離送電する場合の所要回線数が少なく済み、鉄塔も小型となるメリットが得られそうで、将来の大電力長距離送電の有力な手段の1つとして、クローズアップされている。

そこで当所では、UHV 塩原実験場の試験送電線を全面的に改修し、直流電圧発生装置を補強するとともに、関連測定設備を整備して能率的に障害防止対策に関する研究を推進することとし、設備の建設を進めてきたが、57年6月にほぼ完成をみた。

以下、これらの設備の概要および研究の進め方について述べる。(坂本 雄吉)

### 3-5-2 試験送電線

前節に述べたように HVDC のコロナ現象は、気象条件とともに変動するので、これに伴うコロナ騒音(オーディブル・ノイズ、AN と略記される)、ラジオ障害(RI)、テレビ障害(TVI)、コロナ損、イオン流帯電電圧などの障害諸量は統計量として表わされざるを得ず、またその気圧、温度、湿度、風向、風速などの気象諸量との相関が十分明らかにされていないので、通年の分布は1年にわたり測定して統計処理しないと得られない。

しかも前述のように、これらの障害諸量は極間間隔、地上高などに影響されるので、一つの極間間隔、地上高に対して各々1年

の測定を行うのでは、組み合わせのマトリックスをカバーするのに長年月を要し、さらに导体構成による差、極配列による差を研究しようとするに所要年月は天文学的な数字に上り、しかも架線変更工事費に多額が必要で、研究能率、研究費効率上からも望ましくない。

以上の研究能率上のネックを解消するためには、試験線の極間距離および地上高を短時間に変更できるようにし、極間距離と地上高の組み合わせのマトリックスをトレースしつつデータをとり、全マトリックスに対する諸量を測定して、統計処理する方法をとる必要がある。そこで試験線は、図3-5-1のように3径間構成とし、中央径間の極間間隔と地上高が変更できるようにした。

すなわち試験線の鉄塔4基のうち2号と3号を門型とし、電線を支持する水平ビーム2本を上部からワイヤ・ブロック・システムで吊って、ワイヤを鉄塔の下に設けた電動ウインチで巻き戻しすることにより、水平ビームがそれぞれ上下するようにし、電線の垂直間隔と地上高が変更できるようにするとともに、水平ビームにレールを設け、この上を電線支持点が移動できるようにし、これを電動ウインチで動かすようにしている。

両側の1号と4号は引留鉄塔で、電線支持点は固定としている。このような線路構成としたのは、引留支持点を移動させる困難性を避け、また2、3号鉄塔の不平均張力を小さくして水平ビームの上下移動を容易にするるとともに、鉄塔重量の軽減をはかったものである。そこで1～2号径間はこの張力バランスのダミー径間と、電圧印加の母線の役割を果し、また3～4号径間は

張力バランスのダミー径間の役割を果たしている。

この試験線建設のため旧試験線の1～3号は撤去したが、旧4～旧5号は、将来の使用を考えてそのままとした。なおこの既設部分に電圧を印加する場合には、新3～4号は、母線または線路の一部の役割を果たすものである。

以下に、線路の新設部分の主要な諸元を示す。

1. 巨長：750m(径間割以下の通り)
  - 1号：194m、2号：310m、
  - 3号：246m、4号
2. 電圧：DC±400～650kV
3. 方式および回線数：双極2回線
4. 電線：ACSR810mm<sup>2</sup> 4 導体
  - (下ビームは6 導体まで支持可能、但し、

この場合は上ビームは2 導体まで)

5. がいし：上ビーム各極には直流がいし、下ビーム各極には通常の懸垂がいしを使用した。各鉄塔毎の使用がいし種類、個数および吊型は下記のとおりである。

(1号)

上極＝33t 直流がいし、40個 2 連耐張

下極＝33t 懸垂がいし、40個 3 連耐張

(2、3号)

上極＝21t 直流がいし、V吊り懸垂40ヶ

なお、2号ではライン・トラップにより母線側と測定径間を高周波的に絶縁するため、V吊りの下に33t 直線がいし各2ヶ2連の耐張装置をとりつけた。また3号では2～3号径間と3～4号径間を絶縁するため、33t 直線がいし20ヶ2連の耐張装置を設けた。

下極＝33t 懸垂がいし、40ヶ 3 連耐張

なお、ビームおよび支持点を移動させたとき鉄塔に加わる両側径間の不平均張力を小さくするため、上記の耐張装置を長さ約4mのロッドでビームからV状に吊した。

(4号)

上極＝33t 懸垂がいし、40個 2 連耐張

下極＝33t 懸垂がいし、40個 3 連耐張

上記のようにかなり特殊ながいし装置を用いているが、これは2、3号のビームを動かしたときビームに大きな不平均張力が加わってビームがスムーズに動かなくなるのを避け、また2号ではジャンパを極力小さくして、下ビームとのクリアランスを保持することを考えたものである。また下極で3連を用いているのは6 導体化に備えたもので、電線側ヨークは4 導体、6 導体兼

図3-5-1 塩原 UHV 直流試験線概念図(1981. 2. 17)

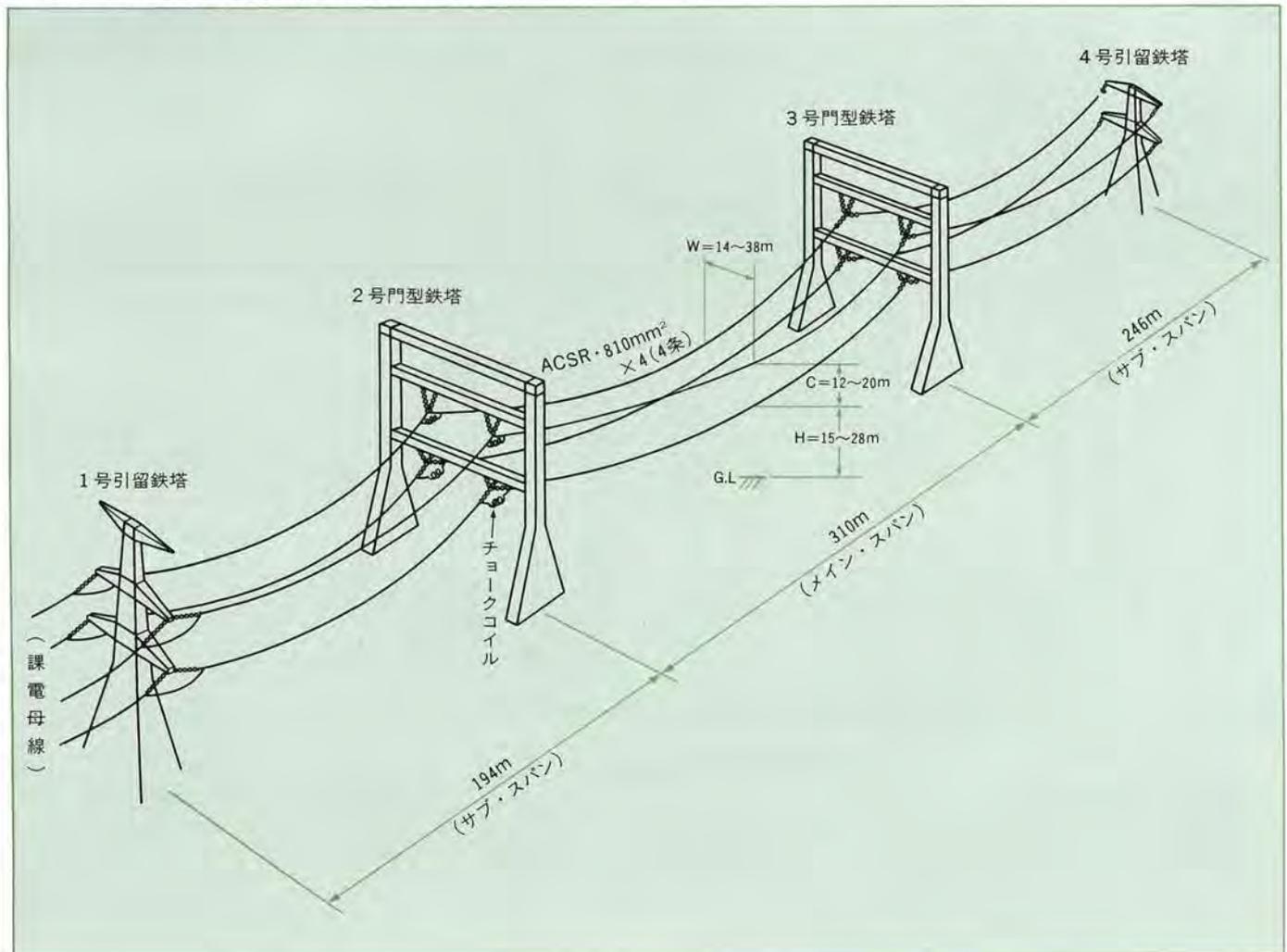
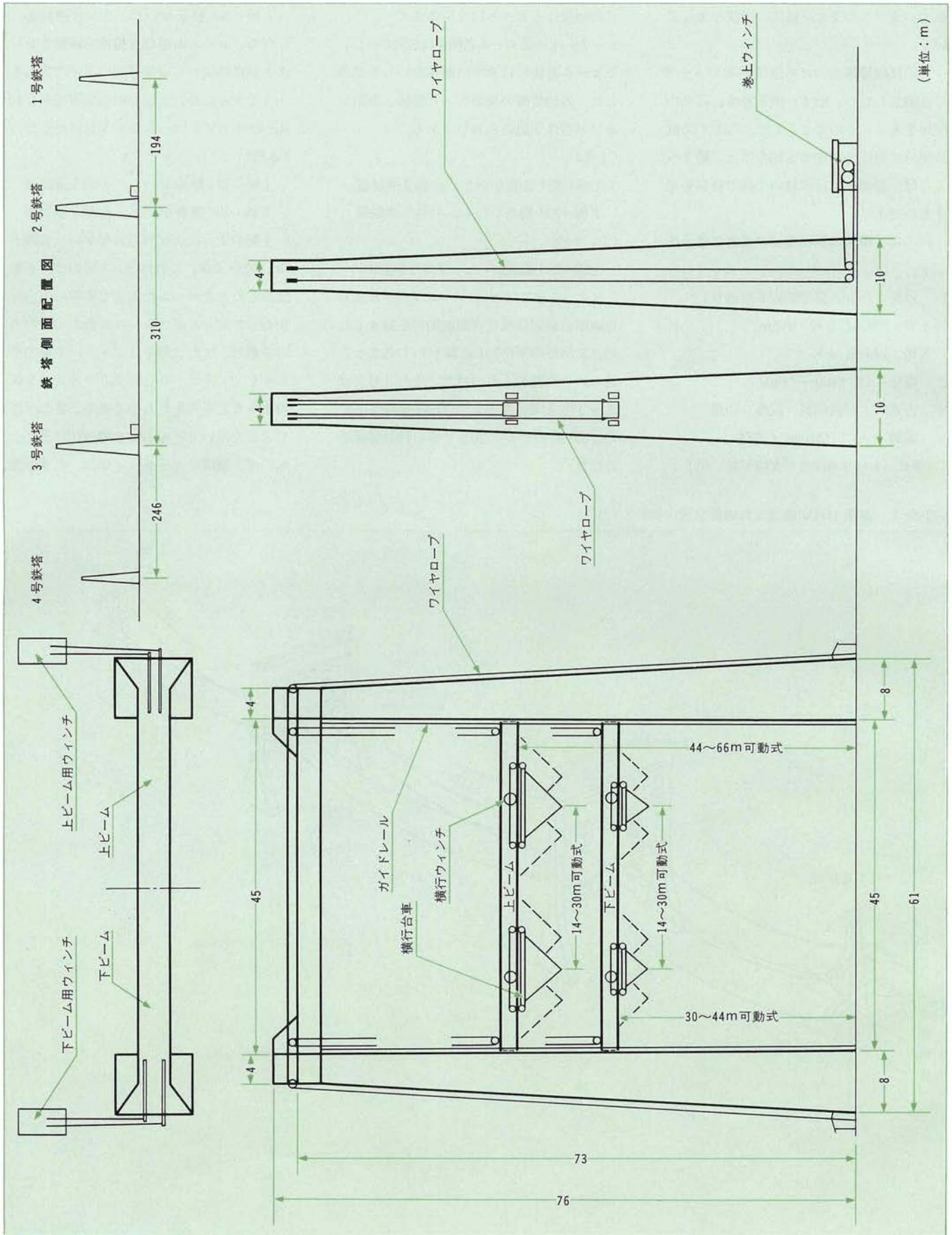


図3-5-2 直流試験送電線2号および3号門型鉄塔/主要ブロック部分全体配置図



用のものを開発し取り付けられている。

#### (6) 鉄塔

2号、および3号鉄塔を図3-5-2に示した。塔頂までの高さ76mの門型鉄塔で、両側の自立鉄塔の内側は鉛直とし、ここにビームを支えるガイド・レールが設けられ、ビームは上端からワイヤ・ブロック・システムで吊されている。

自立鉄塔の内面の巾(ビームの長さ)は45mである。上ビームの可動範囲はビームの下面の地上高で44~66m、下ビームは30~44mで、最低限のところにはストッパーを設けて、使用しないときにはワイヤに張力が加わらないように配慮され、また片側のワイヤが断線したり、両側のワイヤの伸びが違ってビームが傾いたときは自動的に停止保持する機構を有している。

これらのビームを上下させるため鉄塔脚の傍に上ビーム用、下ビーム用各々1台のウインチを設けた。すなわちビームの両端を等速で上下させるため、両端を1台のウインチで操作することとし、このため塔頂にはロープ・ガイドを設けている。

この機構により導体の地上高および垂直間隔を遠隔操作で変えることが可能である。

またビームに吊されたがいし連の支持点を移動させるため、ビームの下面にレールを設け、また電線を支持するがいし連(V吊り)を台車にとりつけ、これをウインチで動かす機構を設けた。

ウインチはビーム上に設けられ、電源は塔体に設けた自動巻きとりリールから供給される。電線支持点の可動範囲は、上極、下極とも電線の水平間隔で14~30mである。

これらの操作は、2~3号の中間に設置した観測小屋の操作盤によっておこなわれるが、特に耐電設計に配慮を加え、また工業用テレビ・カメラで監視できるようにした。(坂本 雄吉)

### 3-5-3 直流電圧発生装置他

塩原実験上には直流電圧発生用の整流器があったが、±650kV級のUHV直流送電の研究には発生電圧が不足するので、これ

を全面的に改修増強した。また試験線の極配列を自由に変更し得るように、母線を設けた。関係設備の諸元をつぎに記す。

#### 1. 整流装置

既設の負荷時タップ切替変圧器(6.6/6.92~1.1kV、1,500kVA)と、試験用変圧器(6.6/350kV、1,500kVA、2台、縦続接続)を使用し、倍電圧整流回路によって±800kVまでの直流電圧を発生する。各エレメントの定格はつぎのとおりである。

##### (i) 整流器(Si)

シリコン整流器：1A、定格入力AC100kV、逆耐電圧400kV、16台

##### (ii) 倍電圧直列コンデンサ(Cs)

直流用OF式コンデンサ：1μF、使用電圧DC150kV、4台直列、計8台

##### (iii) 平滑用コンデンサ(Cp)

直流用OF式コンデンサ：1μF、使用電圧DC150kV、2台並列を7ヶ直列、計28台

##### (iv) 保護抵抗(Rp)

1kΩ、250W、6本直列、2組

##### (v) 均圧抵抗(Rd)

がい管封入型抵抗器：200MΩ、150W連続、DC150kV、22台

##### (vi) 制動抵抗(Rs)：1kΩ、250W、22台

#### 2. 電圧測定用抵抗分圧器

5,000MΩ、DC800kV、正負各1台、コロナ損測定装置を兼ねている。

#### 3. 電圧制御盤

低抗分圧器の出力を受けて、タップ切替変圧器のタップを自動的に調整する、マイクロコンピュータ内蔵の制御盤を備えつけた。塩原実験場では交流電圧を出力する場合もあるので、試験用変圧器4次巻線の電圧を入力とし、所定の交流電圧に調整する機能をもたせ、また集中警報表示盤を兼ねている。

#### 4. 課電用母線

前述のように直流コロナ関係の諸現象は極配列によって異なってくる。そこで極配列を任意に変更できるように工夫した母線を設けた。

課電設備、母線の配置を図3-5-3に示し

た。(坂本 雄吉)

### 3-5-4 コロナ障害測定設備

本試験送電線を対象としたコロナ障害の主たる測定区域として、門型2、3号鉄塔中間区域を選定し、図3-5-4に示すように、イオン流帯電、ラジオ雑音、テレビ雑音、コロナ騒音等の測定センサーをこの区域に集中配置した。これらのセンサーの出力は、一部同区域内にある観測室を經由して、全て1号鉄塔付近にある測定棟に導かれ、所要の処理を行った後、データ集録装置によりデジタル量として磁気テープに記憶される。

また、現地で全般的傾向をアナログ量として、常時、確認しうるように、主要な諸量は、打点記録計でも記録される。

コロナ障害関係の主要な測定装置の仕様を下記に列挙する。

#### 1. イオン流帯電測定設備

(i) 全天候型電場計……………6台  
全天候型回転セクター方式

0±1kV/cm、誤差5%以内

(ii) 帯電体……………延べ35台

10GΩ円板(16台)：10GΩ、100cmφ円板

100GΩ円筒(3台)：100GΩ、

30cmφ×100cm円筒

平板電極(16台)：100cm×200cm、

地表面設置

(iii) 気中イオン計

2重円筒2電極方式

移動度測定範囲：0.08~4.6cm<sup>2</sup>/V Sec

(iv) 附帯設備

42ch高感度直流増巾器……………1式

較正用電圧発生器……………1台

デジタル超高電圧計……………1台

#### 2. ラジオ雑音測定設備

(i) 全天候型アンテナシステム……………2台

455kHz同調型ループアンテナ、

受信感度：25dB re μV/m以上、

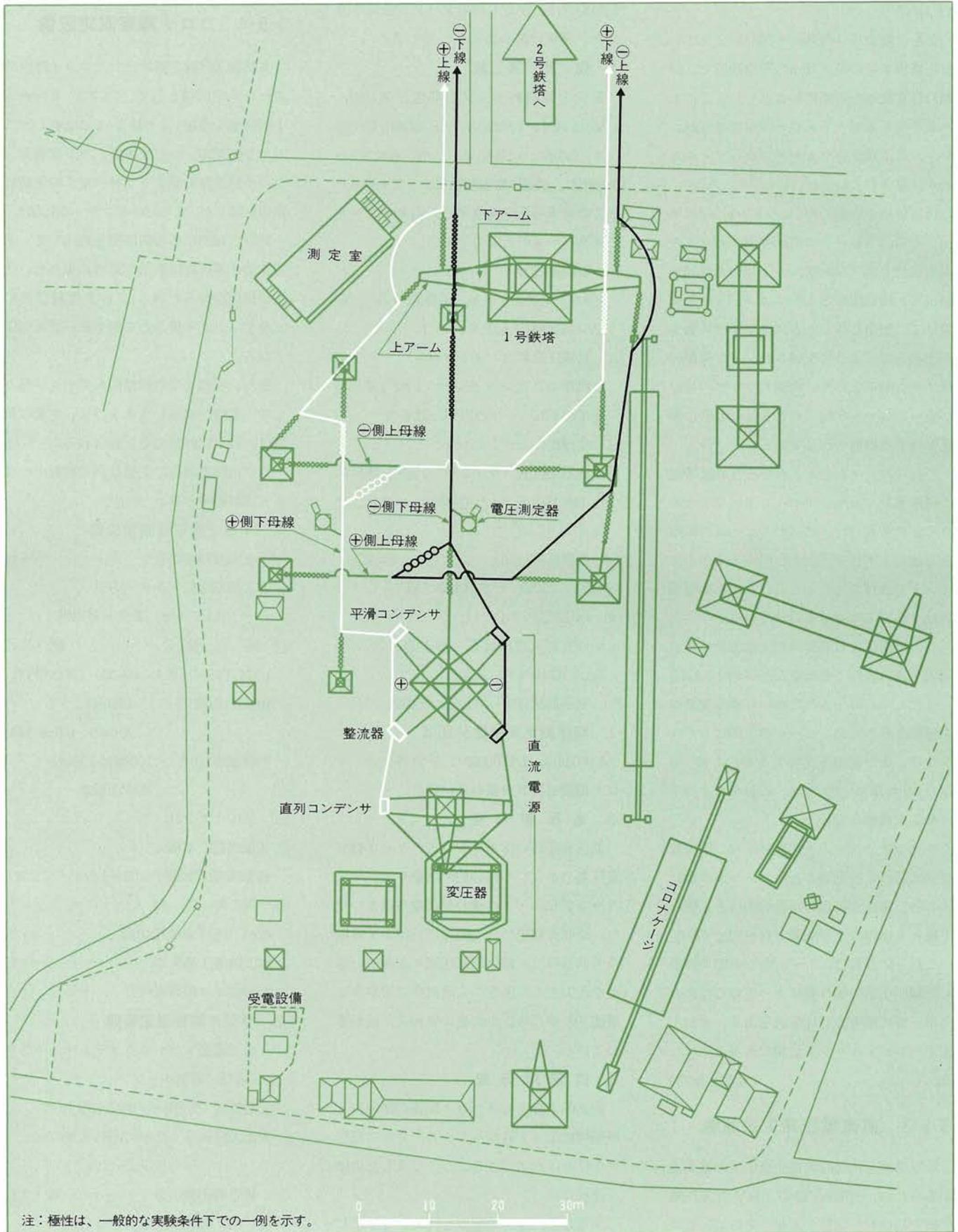
入出力直線性：25~90dB re μV/mで

±1dB以内

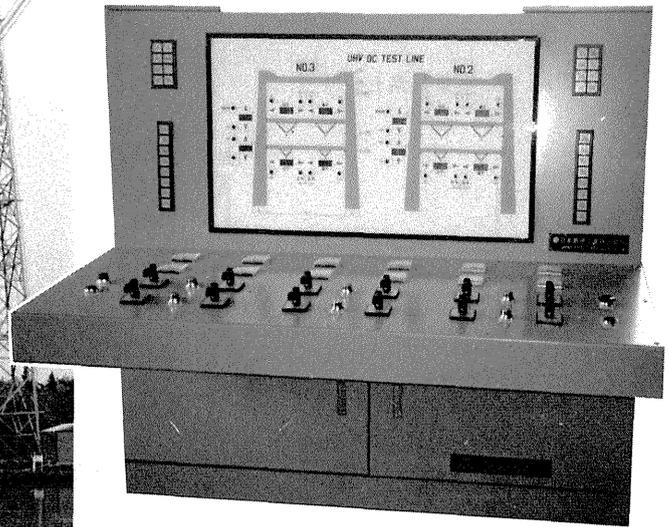
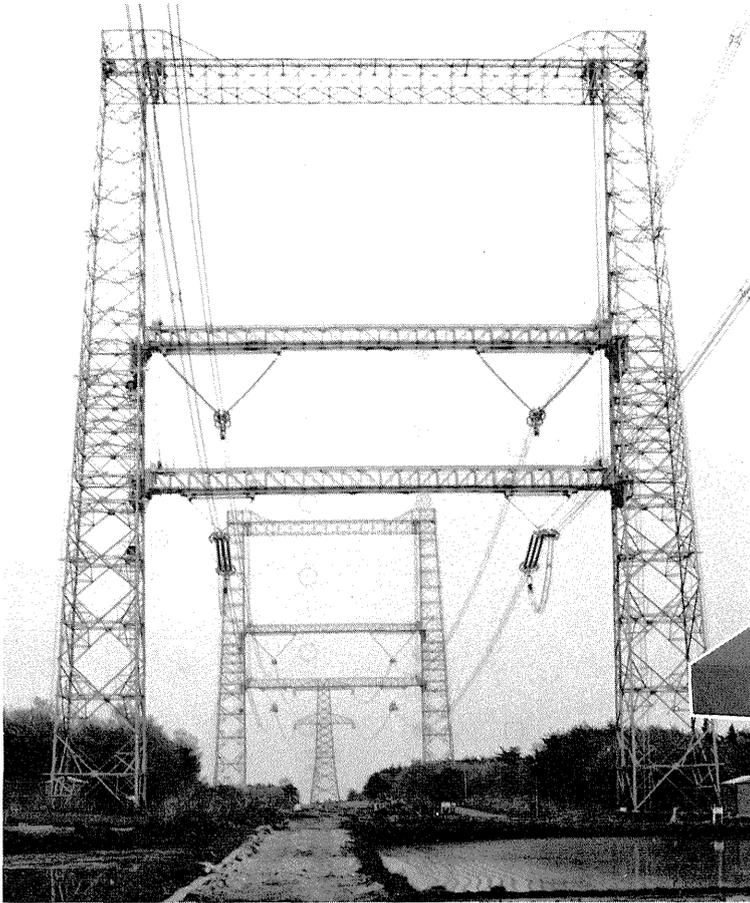
(ii) 雑音電圧測定器……………延べ4台

規格：旧JRTC規格(2台)、

図2-5-3 UHV 塩原実験場構内平面図



電線の高さや間隔を自由に調節できる試験送電線とその操作盤

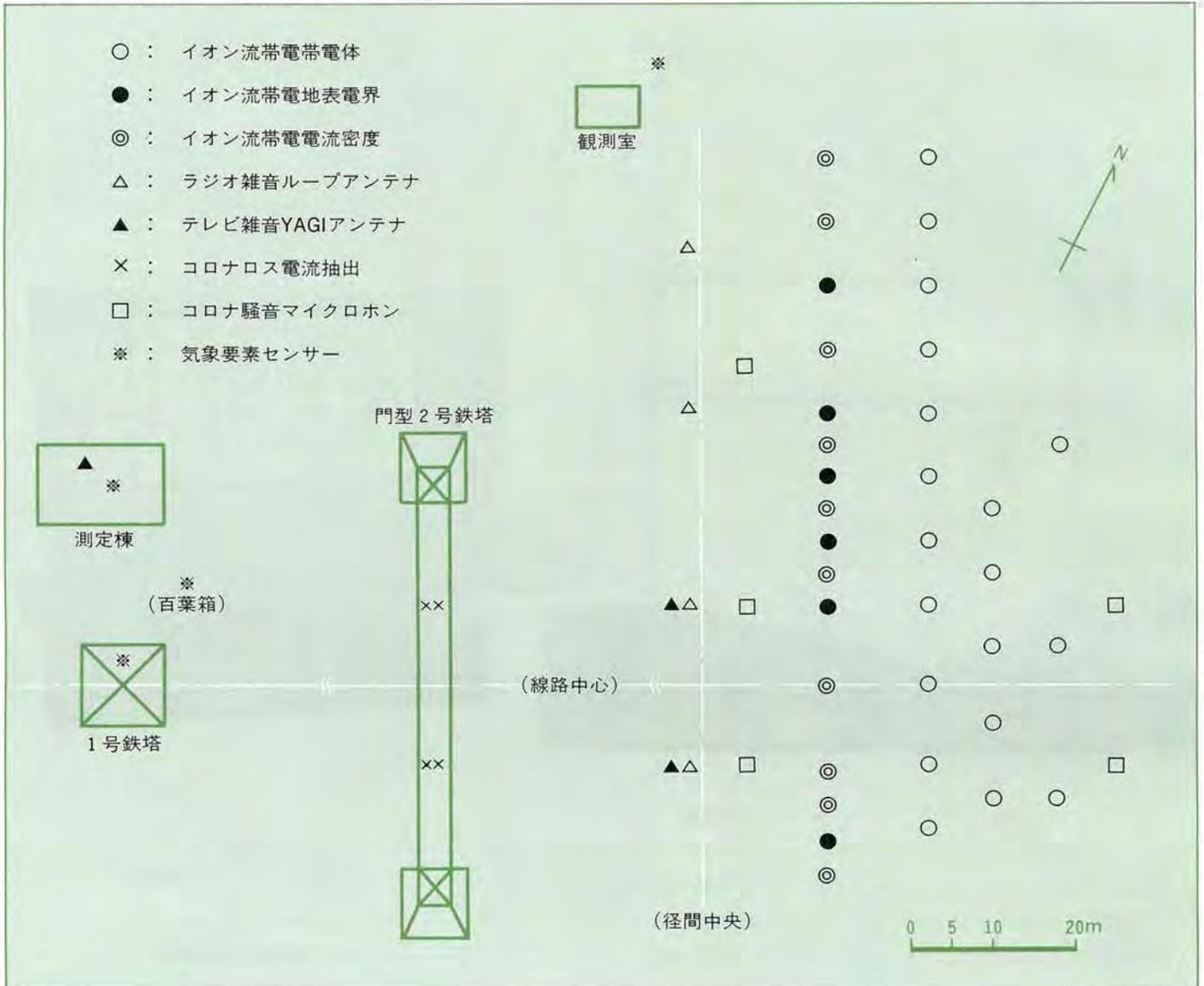


- JRTC規格(1台)、
- 両規格兼用(1台)、
- 受信周波数：455kHz
- 測定範囲：0～90dB re  $\mu\text{V}/\text{m}$
- 測定精度： $\pm 2$  dB以内
- 高周波減衰器自動切替え方式
- (iii) 附 帯 設 備
- 標準信号発生器……………1台
- 校正用標準ループアンテナ……………1台
- 3. テレビ雑音測定設備**
- (i) 固定周波雑音測定システム……………2式
- 規格：JRTC規格
- 受信周波数：99.5MHz、
- 受信感度：10dB re  $\mu\text{V}/\text{m}$ 以上
- 測定範囲：10～90dB re  $\mu\text{V}/\text{m}$
- 測定精度： $\pm 2$  dB以内
- 高周波減衰器自動切替え方式
- (ii) 汎用テレビ雑音電界測定器……………1台
- 規格：JRTC規格、携帯型
- 受信周波数：VHF、UHF帯

- 測定範囲
- VHF帯：2～100dB re  $\mu\text{V}/\text{m}$
- UHF帯：20～120dB re  $\mu\text{V}/\text{m}$
- 測定精度： $\pm 3$  dB以内
- (iii) 附帯設備
- 高指向性アンテナシステム……………1式
- 模擬雑音発生装置……………1台
- 標準信号発生器……………1台
- 4. コロナロス測定設備**
- (i) コロナロス電流測定装置……………4式
- 検出方式：抵抗端子電圧抽出
- 伝送方式：光パルス伝送
- 測定範囲： $\pm 0.1 \sim \pm 62.5$  mA
- 測定精度： $\pm 5$  %以内
- 被測定最高電圧： $\pm 800$  kV DC以下、
- 5. コロナ騒音測定設備**
- (i) 全天候マイクロホン……………5台
- 1/2インチ・コンデンサ・マイクロホン
- 全天候ウィンドスクリーン付
- (ii) 精密騒音計……………1台

- 規格：IEC Pub、179
- チャンネル数：5ch
- 特性：A、B、C、F特性
- 測定範囲：35～130dB(A)
- (iii) 実時間周波数分析器……………1台
- 分析周波数：25Hz～20kHz
- フィルタ：1/1、1/3オクターブ、フィルタ
- (iv) 附帯設備
- 12ch対数増巾器……………1台
- 14chデータレコーダ……………1台
- モニタ装置……………1式
- 波形位相測定装置……………1台
- 6. 気象条件測定設備**
- (i) 標準気象要素測定装置……………1式
- 気温(2台)、気圧(1台)、
- 相対湿度(2台)、風向・風速(3式)、
- 感雨(2台)、日射量(1台)
- (ii) 電線温度測定器
- サーミスタ温度検出方式
- (iii) 微量量測定器……………2台

図3-5-4 コロナ障害測定センターの配置



水滴計数方式(1台)  
広開口集雨方式(1台)

7. データ集録設備……………1式

機能：毎分200chのデータ集録と記憶  
データの一次編集  
測定器制御、緊急避難信号の出力  
UHV 課電圧制御信号の出力

ハードウェア

内部メモリ：128kV  
磁気ディスク：14.8Mbyte  
磁気テープ：9トラック、2400ft  
A/Dコンバータ：160ch  
D/I入力：32bit

カウンタ：8ch  
D/O出力：16bit

以上の他、課電設備重故障、襲雷時等緊急の場合、自動的に測定装置用の電源の開放、各種測定ケーブルの開放と両端接地を実施する保護監視盤も設置されている。

(坂本 雄吉)

3-5-5 研究の進め方

以上 UHV 塩原実験場構内に新設した直流試験送電線および関連設備の概要を述べた。この設備は57年6月初めにはほぼ完成し、現在最終調整を兼ねて1部の試験を開始し

ている。

今後は、先づ現状の設備で随時極間距離、地上高、極配列を変更しつつ長期測定を行い、設計の基礎となる諸量の推定法の開発を行う計画である。またその後は、下極を6導体に変更しての測定に入ることとなる。

なお、極間距離、地上高は、±400kV～±650kVの実用線の範囲をカバーすると考えられるところから、この試験線は実証的本試験にも使用できると考えられる。

(坂本 雄吉)●

### 3-3

1. 沢田他「500kV送変電設備のコロナ雑音およびコロナ損」総合報告：7(1970.6)
2. 沢田他「交・直流架空送電線の電波障害および誘導障害」総合報告：23(1973.8)
3. UHV送電研究推進委員会「大電力直流送電に関する基礎研究」総合報告：107(1980.10)
4. 村串他「武山±250kV直流実規模試験線下物体の帯電現象(810mm<sup>2</sup>単導体電線、双極水平配列の総括報告)」依頼報告：175524(1976.4)
5. 村串他「直流送電線下の帯電現象に関する検討」研究報告：71036(1971.9)
6. 天野他「塩原実験送電線の線下物体のイオン流帯電現象(その1)」研究報告：73109(1974.6)
7. 天野他「塩原直流実験送電線下のイオン流帯電現象(その2)」研究報告：175001(1975.7)
8. 天野他「塩原直流実験送電線下のイオン流帯電現象(その3)」研究報告：177071(1978.5)
9. 天野「イオン流帯電現象に関する検討」研究報告：176012(1976.10)
10. 天野他「UHV級直流送電線によるイオン流帯電現象(その1)」研究報告：177076(1978.5)
11. 須田他「UHV級直流送電線によるイオン流帯電現象(その2)」研究報告：181009(1981.10)
12. 須永「直流送電線の電線周囲電界とイオン流分布(その3)」研究報告：177082(1978)
13. 須永「直流送電線の電線周囲電界とイオン流分布(その4)」研究報告：178048(1979)
14. 須永「直流送電線下物体の流入イオン流と帯電電圧の理論的検討」研究報告：178019(1978)
15. 沢田他「直流送電線の雑音特性(第1報)—ACSR 1,360mm<sup>2</sup>のコロナ雑音とコロナ音およびがいし雑音—」研究報告：72016(1972.7)
16. 須永他「直流送電線の雑音と騒音(第4報)—ACSR 330mm<sup>2</sup> 4導体のコロナ雑音—」研究報告：73112(1974.7)
17. 須永他「直流送電線の雑音と騒音(第6報)—ACSR 330mm<sup>2</sup> 3導体のコロナ雑音—」研究報告：175013(1975.8)
18. 甘楽他「直流送電線の雑音と騒音(第7報)—ACSR 330mm<sup>2</sup> 2導体および単導体のコロナ雑音—」研究報告：176061(1977.6)
19. 須永他「直流送電線の雑音と騒音(第5報)—250kV級がいし連の汚損湿潤時のコロナ雑音—」研究報告：175012(1975.9)
20. 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」研究報告：74051(1974.12)

### 3-2

1. 今城他「直流±500kV OFケーブルの絶縁性能」研究報告：73124(1974.6)
2. 今城他「直流±500kV OFケーブルの絶縁性能(その2)」研究報告：177028(1978.1)
3. 深川他「大電力直流送電に関する基礎研究」総合報告：107(1981.10)
4. 高須他「霧中における人工汚損がいし直流耐電圧特性」研究報告：179026(1979.12)
5. 高須他「霧中における人工汚損がいし直流耐電圧特性(その2)」研究報告：181010(1981.9)
6. 相原他「気中長ギャップならびに長がいし連の直流せん絡電圧に及ぼす大気湿度の影響」研究報告：73084(1974.5)
7. 尾崎他「500kV送電の3相再閉路方式における故障電流しゃ断後の絶縁回復特性に関する実験的検討」研究報告：66076(1967.2)
8. 稲葉他「複合直流しゃ断方式の基礎的検討」研究報告：180069(1981.7)

21. 福島他「直流送電線の雑音と騒音(第9報)—1回線送電線コロナ騒音の概略予測・評価—」研究報告:179039(1980.4)
22. 甘楽他「直流送電線の雑音と騒音(第10報)—ACSR 330mm<sup>2</sup> 導体2回線送電線—」研究報告:180057(1981.6)
23. 福島他「直流送電線の雑音と騒音(第3報)—がいし連の部分せん路による騒音と雑音の実験的検討—」研究報告:73075
24. 福島他「直流送電線の雑音と騒音(第8報)がいしの部分せん路防止法の検討」研究報告:177025(1977.12)
25. 笹野他「UHV 交流送電線の騒音と雑音(ix)UHV コロナケーシングによる1,000~1,200kV級電線コロナ特性の測定」研究報告:178060(1979.7)
26. 杉本「塩原実験送電線における直流コロナ損(第1報)—ACSR 1,360mm<sup>2</sup>単導体のコロナ損特性—」研究報告:72024(1972.7)
27. 杉本「塩原実験送電線における直流コロナ損(第2報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>および240mm<sup>2</sup> 導体のコロナ損特性—」研究報告:73093(1974.6)
28. 杉本「塩原実験送電線における直流コロナ損(第3報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>3導体および240mm<sup>2</sup>4導体のコロナ損特性—」研究報告:74112(1975.6)
29. 杉本他「塩原実験送電線における直流コロナ損(第4報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>2導体の晴天時のコロナ損特性—」研究報告:176065(1977.6)
30. 杉本他「塩原実験送電線における直流コロナ損(第5報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>2導体の降雨雪時のコロナ損特性—」研究報告:177061(1978.5)
31. 出口他「塩原実験送電線における直流コロナ損(第6報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>単導体のコロナ損特性—」研究報告:178016(1978.11)
32. 杉本他「塩原実験送電線における直流コロナ損(第7報)—ACSR 330mm<sup>2</sup>6導体のコロナ損特性—」研究報告:178063(1979.6)
33. 杉本他「直流コロナ電流におよぼす素導体間隔の影響」研究報告:179072(1980.6)
34. 杉本他「直流コロナ損におよぼす素導体間隔および表面状態の影響」研究報告:180022(1980.6)
35. 中山他「UHV 直流送電線の植物に与える影響に関する研究—作物への影響(I)—」研究報告:480019(1981.9)
36. 河村他「電界の生物学的影響に関する文献調査—植物に対する影響」調査報告:480020(1981.8)
- 電所の場合—」研究報告:179008(1979)
4. 吉田他「原子力発電所からの直流単独送電(その2)—PWR 発電機の場合—」研究報告:179066(1980)
5. 電研、UHV 系統部会・機器部会「直流単独送電に関する技術的検討(中間報告)」(1982)
6. 電研、UHV 特別委員会「UHV 送電特別委員会中間報告書—UHV 交流送電に関する研究—」委員会報告:Z82001(1982)
7. 町田「直流送電システムの制御・保護方式の開発と安定度向上対策に関する研究」研究報告:65064(1965)
8. 吉田「交直並列送電における系統動揺抑制対策—最大原理を用いた直流系の最短時間制御方式—」研究報告:74023(1974)
9. 林「交直連系システムの動特性解析手法の開発」総合報告:103(1977)
10. 林、植田「交直連系システムのシミュレーション手法に関する研究(その5)—過渡安定度計算のための直流系統解析手法」研究報告:175028(1976)
11. 吉田他「直流系による交流系統の分割効果」研究報告:176008(1976)
12. 吉田他「電力システムの周波数制御に対する直流連系の効果について」研究報告:67086
13. 電研、直流多端子集中制御装置研実委員会「直流多端子系の集中制御方式に関する研究—直流多端子送電集中制御装置の開発—」研究報告:175050(1976)
14. 石川「交直並列多端子系における事故時制御・保護方式の検討」研究報告:180066(1971)
15. 竹中他「直流多端子系の動特性解析手法の開発(その1)—直流線路分岐式の場合—」研究報告:179042(1975)
16. 吉田他「至近端事故時における直流系の運転能力向上方式」研究報告:175049(1976)
17. 吉田「交直連系システムの交流電圧安定度と周波数制御」総合報告:25(1975)
18. 町田他「交直連系システムの電圧安定性—静的電圧安定度と向上対策」研究報告:177001(1977)
19. 林他「交直連系点の電圧変動特性とその抑制対策—変換装置の無効電力制御による方式」依頼報告:72515(1972)
20. 吉田他「静止型無効電力補償装置による直流系の運転特性向上効果」研究報告:181017(1971)
21. 林他「交直連系システムの定態安定度—固有値法による直流系統の電源発電機への影響—」研究報告:180034

### 3-4

1. 町田他「直流送電の基本運転特性と系統運用制御」総合報告:38(1979)
2. 電研、直流多端子集中制御装置研究委員会「直流多端子送電集中制御装置の開発と実証」総合報告:37(1979)
3. 吉田他「原子力発電所からの直流単独送電(その1)—BWR 発

本部 / 経済研究所 東京都千代田区大手町1-6-1 ☎(03)201-6601 ☎100  
我孫子事業所 千葉県我孫子市我孫子1646 ☎(0471)82-1181 ☎270-11 武山試験研究センター 神奈川県横須賀市長坂2-6-1 ☎(0468)56-2121 ☎240-01  
赤城試験センター 群馬県勢多郡宮城村苗ヶ島2567 ☎(0272)83-2721 ☎371-02 UHV塩原実験場 栃木県那須郡塩原町関谷1033 ☎(0287)35-2048 ☎329-28

## 編集後記

今回は技術範囲として比較的まとまったUHV送電技術の開発状況の紹介でした。インフォメーション・トランスファー(情報移転)の難かしさは前回にも述べましたが、このようにひとつのまとまった分野の紹介は容易に思われます。しかし情報が一層専門化しやすく難解になる危惧があります。前回採用しましたイラスト入の概要は、今回は各節でなく各章のみにしました。マクロの理解にはその方が良いと考えたからです。

次号は環境特集です。

意志疎通のフォーラムとして設けました「かんとうげん」は、その目的を果していると自負していますが、今回は関西電力株式会社吉田登副社長にお願いいたしましたところ快よく引き受けていただきました。紙上をかりて感謝いたします。今回は各節の編集担当者を設けましたが、絶大なる協力が得られました。全体の編集には、電力技術研究所瀬田泰助副所長が担当されました。また、電力技術研究所有働龍夫所長には全搬に亘っての整合性について貴重なアドバイスをいただきました。ここに感謝いたします。

### UHVは研究者のロマンでもある

——次は発想の転換が必要——

夏、晴れた休日に新宿や池袋のような都心にでかける。ほかの人達は海や山にでかけているはずだと思ひ込みたいところだが、都心も混雑している。歩行者天国といえど

も衝突なしには歩けない。なんて人間が多いのだろう。アジアでも人口の多いと思われるインドネシアに比べても、わが国の人口密度はその2倍であると思って驚いた。米国の22倍もある。われわれは“密集して住んでいる”のだ。

MITのロビンソン教授(国際事業技術移転、日本・中東専門)の記事(Technology Review Aug./Sept.,1982)によると、日本人がWeとTheyとの区別をしていないのは相像を絶するという。単一民族であるからだろうか。労働者、管理者、使用者、労組、企業政府、消費者、資本家の間のギャップは米国からみると無きに等しいようだ。これは対立よりも“和をもって尊しとなす”儒教の精神によるものであろう。

わが国は、戦後飛躍的な経済成長をとげ、世界を驚かせたが、これはまさに国民一体となった“和”のおかげである。電力は現在わが国のエネルギー消費の約30%を分担するに至っているが、この経済成長を裏から支えてきたとあっていいだろう。その増加率は経済成長率よりも大きかったことは銘記すべきだろう。

この電力を“密集して住む人達”に送るのが送電線であり、これも飛躍的發展をとげた。その一側面が送電電圧の上昇である。約20年に1回電圧が倍増し、この調子でいくと昭和70年(1995)頃には1,000kV級送電が実現すると計算される。これはまさに本レビューの主題である。

1,000kV級送電はUHV送電とも呼ばれているが、これは研究者のロマンでもある。

本レビューの諸言には「(電圧倍増の歴史は)次から次へと大きくなる技術者の夢も大いに関連があるのではないだろうか」との記述があるが、この研究者の夢は社会のニーズとマッチし、電圧階級154kV、275kVおよび500kVによる送電が実現していった。これはやはり“和”の勝利でもあった。

UHV送電も「送電機能委員会」や「UHV開発推進委員会」という“和”の中で技術開発が行われたといえる。これまでの20年倍増という経験則によると、2020年には2,000kV級の送電が必要と計算されるが、研究者の夢はふくらんでいるのであろうか。夢は中庸な経済成長の黄昏に模倣としている。この経験則による連続性の発想は転換がせまられているようだ。

発想の転換に“和”やそれにつながる“平均思想”は武器になり得るだろうか。まずそのことについて発想の転換が必要である。これからは独創性がさらに重要になる。独創の結果を育てるのは“和”であろうが、独創性を発露するのは“個”であろう。自他の区別をしっかりとし、“個”を確立することが必要である。幸いわれわれは密集して住んでおり、人が多いのだから、平均思想に頼らなければ、議論百出に違いない。

議論百出が一層容易に行えるよう環境・雰囲気づくりが必要である。次にその中から光るものを見出し、研究を推進していく。これが未来技術の不透明さに立ちむかっていく研究者の新しいロマンと言うべきであろう。送電技術研究の新たな展開を望みつつ。 ●

R