

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

掲載内容（サマリー）：

トピックス：

- フジサンケイビジネスアイ賞受賞と受賞式について

特集：再生可能エネルギーと超電導

- 最近の動向
- 10 MW 超級風車の調査研究 - 超電導発電機の要素技術研究開発（2014.6 月号特集記事より）
- 石狩プロジェクトの現状（2013.11 月号特集記事より）
- 再生可能エネルギーと超電導限流器
- ALCA プロジェクトにおける SMES を用いた再生可能エネルギーの有効利用
- 風力熱発電

- 超電導関連 2014 年 9 月-10 月の催し物案内
- 新聞ヘッドライン（7/20-8/19）
- 世界の動き
- 「ASC2014」報告
- 隔月連載記事「高温超伝導電力機器の冷却技術」（その 5）
- 連載記事「やさしい電力系統のはなし」（第 8 回）
- 読者の広場「最近、欧米のメーカーの MgB₂ 線材の話を聞きますが、2001 年に秋光先生が発見された後、どうなっていますか？」

[超電導 Web21 トップページ](#)



超電導 Web21

〈発行者〉

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局
213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3 丁目 2 番 1 号 KSP A-9
Tel 044-850-1612 Fax 044-850-1613

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>

この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

トピックス：フジサンケイビジネスアイ賞受賞と受賞式について

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉



表彰式

6 月 12 日、成蹊大学三浦正志氏、昭和ケーブルシステム (株) 木村一成氏・小泉勉氏、ISTEC/SRL の吉積正晃・和泉輝郎・塩原融氏の「ナノ組織制御及び人工欠陥導入次世代超電導線材の開発」が高い評価を受け、フジビジネスアイ社主催第 28 回先端技術大賞のうちフジサンケイビジネスアイ賞を受賞しました。

先端技術大賞は、1987 年から先端技術分野で活躍する研究者、技術者を育成するため創設され、今回、「学生部門」、「企業・産学部門」の 2 部門で計 8 賞が選ばれましたが、そのうちの 1 賞がフジサンケイビジネスアイ賞です。

7 月 31 日午前、明治記念館にて高円宮妃久子さまをお迎えし、関係者約 300 名が出席し表彰式が開催されました。妃殿下のお言葉、来賓として文部科学大臣、経済産業大臣（それぞれ副大臣代読）のご祝辞を賜った後、表彰が行われました。

授賞式後にレセプションが開催され、その間、妃殿下が各受賞説明パネル展示にて、受賞者から表彰内容の説明を受けられました。妃殿下におかれては、超電導へのご関心が高いご様子で、約 10 分間の間、ご説明に対し熱心にご質問をされておられました。なお、約 1 時間のレセプション中、さまざまな列席者から展示に対し質問等を受け、超電導技術の最新状況の紹介に努めました。



説明コーナーにて

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：再生可能エネルギーと超電導 「最近の動向」

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 山田 穰



図 1 再生可能エネルギーに関係する代表的な高温超電導プロジェクト。
風力の SupraPower-Pj を除いて、他は全て系統試験である。SFCL:超電導限流器。

○進む、再生可能エネ関連研究:ASC 会議でも目立つケーブル、限流器応用

2014 年 8 月 10-15 日に米国シャーロット市で ASC2014 が開催されたが、超電導の再生可能エネルギー関連の研究で、ケーブル、限流器、風力、SMES が多数あった。その内の主要なものを図 1 に示した。系統連携試験、連続運転の実証試験が多く、実用化に向けて世界中で益々開発が加速されている。

ドイツのエッセン市では、AmpaCity プロジェクト (10kV/2.3kA) により、市中の実際系統で 1 km のケーブル、限流器を導入した運用試験が今年開始された。ケーブル敷設のために、交通を遮断し夜間に道路工事をし、変電所への接続を行っている様子は実用に益々近づいていると思わせるものであった (線材は住友の Bi 線である)。

系統運用試験ですでに実績を上げているものもある。例えば、日本の東電のケーブル (240 m, 66kV/1.75kA) は、旭変電所での 1 年間の運転を成功裏に終えた。現在、実用化へ向けた冷却系の改善に取り組んでいる。また、イタリアでは RSE (Recerca sul Sistema Energetico S.p.A.) と a2a Reti Elettriche (ミラノ電力会社) が組んでミラノ近郊の変電所で超電導限流器 (12 kV/4.6 MVA) の 2 年間の運用試験を無事終え、今年、新聞発表を行った。

こうした実績を受けて、米国ではまず、今年 7 月に Central Hudson 社が NY 市郊外の変電所 (115/14.4 kV) に超電導限流器を設置した。SuperPower (Furukawa) 社製の線で Applied Materials 社が限流器を作っている。試験は、2014 年 5 月から 1 年間にわたって実施され、性能データがニューヨーク州公共サービス委員会に提供される。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

また、AMSC 社は米国国家安全省 DHS のファンドでシカゴ電力網の保護のために、高温超電導を使った Risilient Cable を敷設することを発表した。今年から、4-5 年かけて 3 マイル (約 5 km) のケーブルを ComEd 社 (シカゴ) の系統に敷設する。総額は約 60 億円である。また、韓国では KEPCO 韓国電力が済州島で交流 (154kV/600MVA-1km)、直流 (80kV/500MVA-500m) ケーブル試験を計画しているが、直流の方は、この 10 月から通電を開始する。

このように、いよいよ世界の各所で超電導の電力応用、再生可能エネルギー応用が活発化している。

○ 風力応用 : 激しいコスト競争

風力発電は、再生可能エネの中でも最も導入量が多いが、IEA の予測 (表 1) によると、洋上風力だけでも、2030 年には世界的に 375 GW、2050 年には 1150 GW にもなる。現在の市販機の主流である 2 MW 機にすると、各々 20 万台、60 万台近くにもなる。発電量増大のため、装置の大容量化が進んでいる (例えば、日本福島沖洋上風力は 7 MW) が、頭上 100 m 以上の風車の上に数百トンもする発電設備装置を載せるのは限界があるため 10 MW 以上は難しいと思われる。このため、大容量機を超電導発電機により軽量化する検討が世界の各国で進んでいる。中でも、欧州の SupraPower プロジェクトは、低コストな MgB_2 線による 10 MW 超機の検討を始めた。Acciona WindPower、冷却の Oerlikon-Leybold Vacuum、超電導線材会社、カールスルーエ国研などの欧州の主要機関が参加し、Technolia 社 (スペイン) が全体をまとめている。報告によると風力市場の競争は激しく、結局コストの問題に行き着く、このため、動作温度は低くなるが、低コストな MgB_2 を選択したとのこと。総額は、5.4 億円で 2012 年 12 月から 2016 年末まで実施される。設計上従来 10 MW 機で 380 ton になる発電機を 200 ton (超電導機) にする。コストは、従来機の延長技術の 10 MW 機で 2.8 M€ (3.8 億円相当) になるが、それ以下を目指す。

前記 ASC では、新たにオーストラリアから Guina Energy 社という会社も、風力ほかのテーマで全部で 6 件も発表しており、これも再生可能エネルギー関連に超電導の R&D が広がっているためと思われる。

表 1 洋上風力の導入予想 : (IEA2010World Energy Outlook から)

2020年	2030年	2050年
EU 40GW	150	460
世界 100GW	375	1150

○ まとめ

近年、EPRI は米国の CO_2 排出量予測と新技術導入効果の分析を報告している。対策がないと、2030 年には現状の 1.5 倍に膨らむ排出量が、再生可能エネルギーなどの種々の技術導入で 45% も減らせ 1990 年のレベルになる (本号 ASC 会議報告の写真 3 参照)。欧州でも今や再生可能エネルギー発電量がドイツ、スペインなど日によっては全発電量の 40 % を超えることが報告されている。上記風力応用、超電導ケーブル、限流器、SMES など、超電導技術が益々これらと融合して、未来社会に省エネ、 CO_2 削減効果で大きな役割を果たせるチャンスが出てきたと考えられる。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：再生可能エネルギーと超電導

「10 MW 超級風車の調査研究 - 超電導発電機の要素技術研究開発」

独立行政法人 産業技術総合研究所
エネルギー技術研究部門
超電導技術グループ長 山崎裕文

[超電導 Web21-2014 年 6 月特集記事をご覧ください。](#)

特集：再生可能エネルギーと超電導

「石狩プロジェクトの現状」

中部大学大学院
超伝導・持続可能エネルギー研究センター
教授 山口作太郎

[超電導 Web21-2013 年 11 月特集記事をご覧ください。](#)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：再生可能エネルギーと超電導 「再生可能エネルギーと超電導限流器」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

○再生可能エネルギーの大量導入の電力流通系統への影響

再生可能エネルギーの大半を占めると想定される風力発電と太陽光発電は出力が比較的大きく変動するのが特徴である。蓄電池等の導入によりこの変動を緩和する対策がある程度は図られるであろうが、流通系統、特に発電容量から見て比較的電圧の低い 6~7 万 V 以下の流通系統（以下、地域系統）への影響は大きいと想定される。

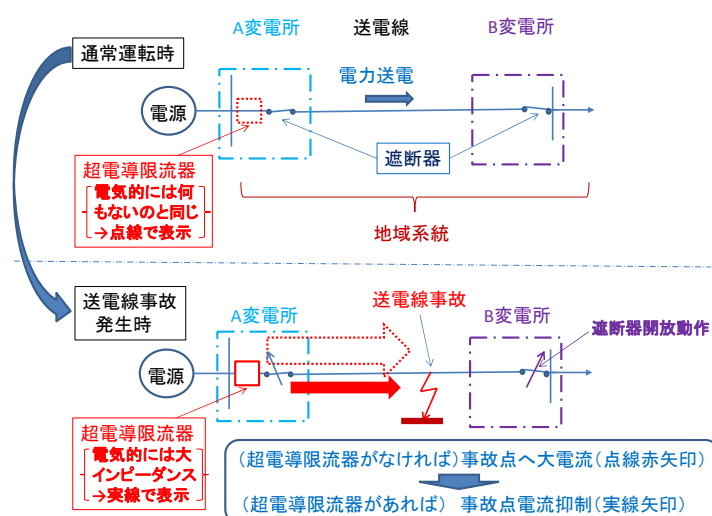
出力変動は、電圧変動、無効電力変動、相差角変動を地域系統にもたらし、それらが大きくなると近傍需要家への悪影響（供給電圧変動等）、更には地域系統の安定性低下をもたらす懸念がある。

○再生可能エネルギー導入時の悪影響回避策と事故電流レベル増大

電圧変動や安定性低下の回避策として、安定化に寄与す交流電源が近傍に設置されるのが理想である。諸外国を見ても、再生可能エネルギーが増加しても交流電源の運転が極力維持される。なお、再生可能エネルギーに対する交流電源の運転維持は周波数面のみ注目される傾向があるが、地域系統の電気品質面から見ても電圧変動対策が必要と考えられる。一方、交流電源を近傍に設置する事は、電気工学的に見ると、交流電源と地域供給エリア間のインピーダンスを減じることと等価で、送電設備や変電設備の増設、放射状運用のループ運用化、ループ運用のメッシュ運用化等でも実現でき、発電設備増強コストと比較し安価な場合が多い。

この様な対策実施の際に見落とされがちなのは、「インピーダンスを減じること」は事故電流増大を伴うことである。事故電流が増大し流通設備や需要家の設備の耐力を上回るとそれらの設備が損壊するので看過できない問題となり、対応できない場合、前記対策は「絵に書いた餅」になりかねない。

図で説明すると、事故が発生した後に遮断器の開放操作がなされても、電流遮断能力を上回る事故電流が流れると遮断器が壊れてしまい事故も継続する（電力が送れない状況が継続）。そこで通常時は系統インピーダンスが小さいが、事故電流が流れる時だけインピーダンスを増大させ事故電流を減じる方策を講じることができれば問題も生じない。



超電導限流器の基本コンセプト

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

○事故電流対策としての超電導限流器の有用性

事故電流を抑制する機器は限流器と呼ばれ種々の方式がある。超電導は、SN 転移の特性、すなわち一定以上の電流が流れると超電導状態（抵抗：零）から常電導状態（抵抗：大）に「自然」に転移する。前記の「通常は系統インピーダンスを減じる」は、超電導では抵抗零であるため問題は全くなく、事故発生時、事故電流が流れ始める初期段階でインピーダンスが大きくなり、事故電流増大を防ぎ限流器として理想的な動作を行う。また、超電導の「自然特性」が前記ニーズとマッチする、のは工学的に見て信頼性面等から好ましい。このため、再生可能エネルギーの大量導入に対応して超電導限流器のニーズが高まると想定される。

○広範に採用される超電導限流器開発に向けた課題

超電導限流器は基本ニーズにマッチするものの課題がある。特に日本では、事故が除去された後、短時間で事故が発生した設備が再使用される、いわゆる再閉路方式が架空送電線保護に採用されており、これに対応した特性が必要なことである。具体的には、短時間で常電導状態から超電導状態に復帰している必要がある。復帰していないと再使用時に大きなインピーダンス（抵抗）が発生し、「インピーダンスを減じる」との基本ニーズを満たさなくなるためである。このため、高速超電導復帰を実現する技術開発が課題となる。なお、地中線や変電設備（需要家の受電設備を含む）では短時間再閉路は実施されないため、これに特化した限流器なら高速復帰特性は不要である。

次に、超電導限流器のコンパクト性、地域系統に見合った経済性の実現の課題がある。地域系統はコンパクトな設備が多く限流器設置スペースは限られるので、コンパクト性は重要な開発要素である。また、地域供給系統は、比較的低コストで設備形成がされており、初期投資が大きい or 運転コストが大きい設備では広く採用されることは期待できない。以上の課題を克服した超電導限流器の開発が期待されている。

世界的に見ると、地域系統はループ運用、メッシュ運用されている国が多く（日本は、基本的に放射状運用）事故電流レベルが高く、事故電流増大への対応が従来から課題となっている。このため、超電導限流器のニーズも高く、多方面から開発が進められている。このため、日本の超電導技術力を生かした競争力のある限流器が開発されれば、参入余地は大きい。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：再生可能エネルギーと超電導

「ALCA プロジェクトにおける SMES を用いた再生可能エネルギーの有効利用」

東北大学

名誉教授 濱島 高太郎

地球規模での CO₂ 削減が持続性社会を構築する上で重要な喫緊の課題となっている。地球に優しい再生可能エネルギーの導入が望まれるが、再生可能エネルギーは確率論的にランダムに激しく変化するので、商用電力システムへ直に連系する量が多くなると周波数変動の発生が懸念され、連系できる量に制約が発生する。この制約をなくすには、電力貯蔵装置を有効に活用して一定に制御した電力に変換する必要がある。貯蔵装置の中で、超電導電力貯蔵装置 (SMES) は大電力の入出力応答の迅速性、充放電の繰り返しに優れた耐久性を有し、水素システムは燃料電池発電装置 (FC) と水電気分解装置 (EL) と組み合わせて大容量の水素エネルギー貯蔵が可能となる特長を有するので、これらで構成するハイブリッド貯蔵システムは、激しく変動する再生可能エネルギーを一定の電力へ変換するのに適している。さらに、SMES は経済性のある MgB₂ 線材で巻線すると、MgB₂ の臨界温度が 39 K であるから液体水素 (20 K) で冷却できることになり、近い将来の燃料電池車のガステーションとして、経済性と環境性が期待できる液体水素ステーションの冷媒を利用できる。これらの装置を構成要素とした先進超電導電力変換装置 (ASPCS : Advanced Superconducting Power Conditioning system) を Fig.1 に示す¹⁾。

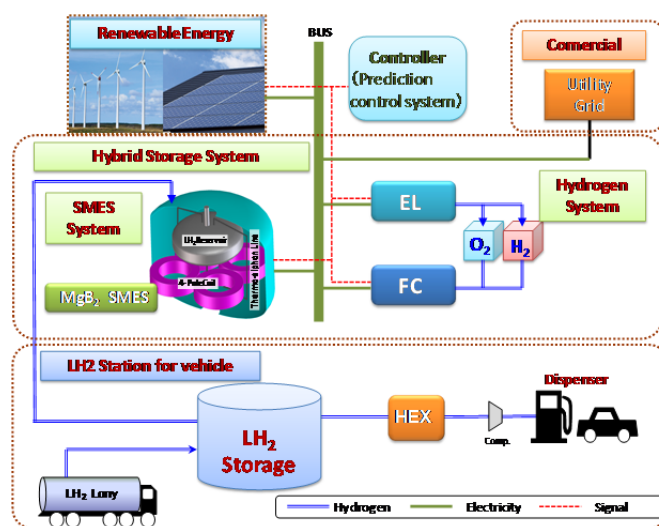


Fig.1 ASPCS の概念

SMES と水素システムの機能を発揮するには、再生可能エネルギーをそれぞれに適した成分に分解する必要がある。ランダムに変動する再生可能エネルギーの電力波形は平均トレンド成分と変動成分に分解でき、トレンド成分は比較的ゆっくりとした変動であるが、大きな貯蔵容量を必要とするので水素システムに適しており、変動成分は頻繁な入出力となるので SMES に適する。トレンド成分はゆっくりとしているので、カルマンフィルタで予測することができる。Fig. 2 に、20,000~22,000 秒の間の時間における、定格 5 MW クラスの風力波形 P_{wind} と一定の出力波形 P_{out} 、

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

風力の変動の平均トレンド電力波形 P_{pred} を図の上部に示し、燃料電池 (FC) からの出力 $P_{FC} = P_{pred} - P_{out}$, EL への入力 $P_{EL} = P_{out} - P_{pred}$, SMES への入出力波形 $P_{SM} = P_{wind} - P_{pred}$ に分解したときの各成分波形を下部に示す¹⁾。図から、トレンド波形は風力波形の変動の平均値に少し遅れるが、良く変化に対応しながら予測していることが分かり、また、SMES への入出力は頻繁であり、水素貯蔵システムは大容量でゆっくりとした入出力であることが分かる。ほぼ 1 日に相当する 20 時間にわたって SMES への充放電量とその頻度のヒストグラムを Fig.3 に、また、統計処理したものを Table 1 に示す。図から、ほとんどの SMES の入出力は小さなエネルギーの頻繁な充放電の繰り返しに集中していることが分かる。1 日の充放電回数は約 2,000 回であるから、1 年で 720,000 回となり、SMES の特徴である繰り返し耐久力を十分に利用できる。また、エネルギーはそれほど大きくないので、SMES の貯蔵容量は少なくて済む。さらに、目標出力 P_{out} を適切に選択することにより、ほぼ一定の電力を供給した場合の効率を試算すると、Fig.4 のようになる。ただし、SMES, EL, FC の効率を夫々 95, 80, 40 % とした。図から、目標出力を適切に選択することにより、効率が 80 % 以上になる場合もある¹⁾。このように、SMES の特長を生かした再生可能エネルギーの有効利用は超電導応用の新しい道を開拓することになるであろう。このシステムの概念を実証するために、現在、1 kW 級の小型 ASPCS を組み立てており、岩谷産業中央研究所 (尼崎市) で実証試験をする予定である。

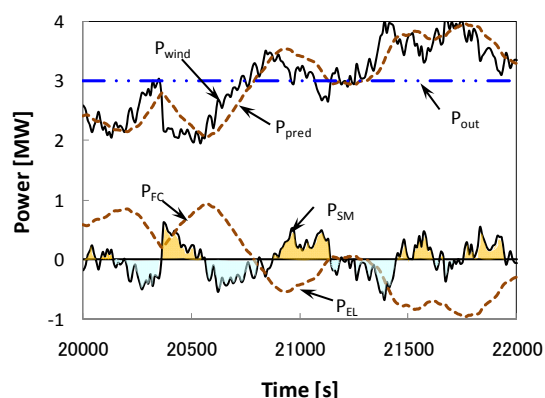


Fig.2 風力 P_{wind} , トレンド予測電力 P_{pred} , 目標出力 P_{out} , SMES への入出力 P_{SM} , FC の出力 P_{FC} と EL の入力 P_{EL} の波形

Table 1 SMES の充放電エネルギーの統計量

充放電頻度	1,780 回
平均充放電電力 P_{av}	0.13 MW
平均充放電エネルギー E_{av}	5.1 MJ
充放電エネルギーの分散 σ	10 MJ
$\pm 3\sigma$	60 MJ

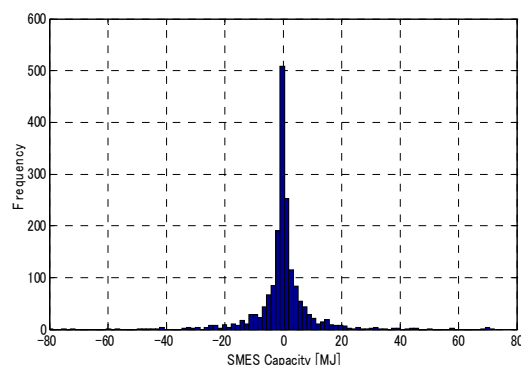


Fig.3 SMES の充放電エネルギーのヒストグラム

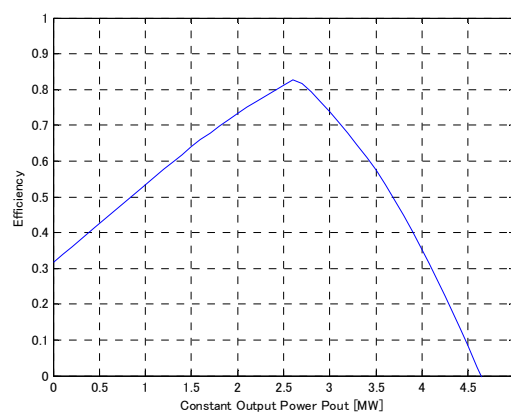


Fig. 4 目標出力 P_{out} を変化させたときの貯蔵効率

本研究の一部は独立行政法人科学技術振興機構 (JST)、先端的低炭素化技術開発事業 (ALCA) の委託を受けて行った。本研究の一部は以下のメンバーの協力の下に行った。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

津田理、宮城大輔（東北大学）、新富孝和、槇田康博（高エネルギー加速器研究機構）、高尾智明（上智大学）、花田一磨（八工大）、岩城勝也（岩谷産業）、平野直樹（中部電力）

参考文献：

1) T. Hamajima, *et al.*, "Application of SMES and Fuel Cell System Combined With Liquid Hydrogen Vehicle Station to Renewable Energy Control", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 22(2012), 5701704(1-4)

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

特集：再生可能エネルギーと超電導

「風力熱発電」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発・国際部
部長 岡崎 徹

科研費を利用して風力熱発電の検討を進めている。ニューヨークタイムスに掲載されたように¹⁾、不安定な再生可能エネルギーの安定化には電池より蓄熱の方が有利だ、と認識されつつある。kW-h コストが蓄熱は電池より 1/20 程度と圧倒的に安いのである。蓄熱から電力に変換する際の効率は 40 %と電池の 70 %強に比べて低い。しかし蓄積コストの安さと、太陽熱発電における系統規模での実績から現実的な蓄熱が有望となってきた。図 1 は、稼働中の太陽熱発電所の蓄熱部である。これほどの規模で安定運転している実績は大きい。

なお、ここで言う安定化とは数時間以上の長時間エネルギー蓄積を指す。熱機械は一般に短時間での出力変化は難しいためアンシラリーサービスの様な短時間安定化には電池や SMES の方が有利になる。



図 1 300 MWh ものエネルギーを 23 m 直径のタンクで貯める

再生可能エネルギーの安定化に蓄熱が有利となった状況では、太陽と同じく不安定な風エネルギーも直接熱に変えた方が有利になる。この発想が風力熱発電である。風車頂部にて、回転する導体に磁場を印加し渦電流を発生させ加熱する。熱は熱媒体を循環させて取り出す。条件にもよるが電池安定化システムと比べてコスト半分で、火力などのアシストコストを含めた既存風力と同程度の発電コストになる。既存風力ではどんなに大量に導入しても火力発電所を削減することは不可能で、本来の二酸化炭素削減の目的とは完全に合致しない²⁾。日本ではこの潜在コストは僅かな電気料金の上乗せになり広く浅く負担している。風力を大量に導入したデンマークなどは非常に高額な電気料金となっている。

熱に変える際には出来るだけ高温にすることが望ましい。なぜならば高温であるほど熱電変換の効率は上がり、例えば最新ガスタービンでは 60 %を越える効率が得られる。また多様な熱化学反応が可能となり水の電気分解による水素製造、天然ガスの改質、アンモニア合成、二酸化炭素回収などの応用も広がる。これらの反応のためには 800 °C 以上の温度が必要であるが、この温度になると鉄などは磁性を失い、渦電流発熱が難しくなる。しかし磁性体が無くとも強力な磁場を作れるのが超電導である。これには前例があり、世界最初の超電導炉は非磁性体に強力な磁場を作れるという超電導の特性を上手く利用している。セラミック容器などに封入すれば導体の沸点まで到達可

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

能なため、熱電変換効率の向上もしくは熱化学反応への応用が容易になる。使用する超電導マグネットは直流で 1~2 テスラもあれば充分なので開発課題もほとんど無い。-250 °C と +800 °C が隣接するが、シリコン単結晶炉などでの実績もある。

市場に関しては国内の陸上風力だけで 2030 年には 20 GW が計画されており、世界に目を向けると陸上だけで 1,000 GW 近い増強計画がある³⁾。日本に限れば 2 MW 機換算で 1 万基、世界では 50 万基の風車が建設されることになる。超電導採用の風力熱発電が経済的に成立することが実証されれば非常に大きな市場となることが推定できる。



図 2 稼働中の超電導炉。超電導を意識することなく連続稼働している。

参考文献：

- 1) http://www.nytimes.com/2014/04/22/business/energy-environment/ice-or-molten-salt-not-batteries-to-store-energy.html?_r=0
- 2) 岡崎徹：「風力熱発電」電気学会電力技術電力系統技術合同研究会、PE-12-156, PSE-12-172 (2012-8)
- 3) 牛山泉：「風力発電が世界を救う」日経プレミアシリーズ、ISBN978-4-532-26175-7

超電導 Web2.1 トップページ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

超電導関連 ‘14/9 月－10 月の催し物案内

9/2

第 54 回 (2014 年度) 真空夏季大学

ヤマハリゾートつま恋

<http://www.vacuum-jp.org/SUMMER/summerhome.html>

9/7-10

物理学会 秋季大会 物性関係

中部大学

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.html>

9/10-12

電気学会 電力・エネルギー部門大会

同志社大学

http://www.iee.jp/pes/?custom_event=%E9%9B%BB%E5%8A%9B%E3%83%BB%E3%82%A8%E3%83%8D%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%83%BC%E9%83%A8%E9%96%80%E5%A4%A7%E4%BC%9A

9/17-20

応用物理学会秋季学術講演会

北海道大学

<http://www.jsap.or.jp/index.html>

9/18-21

物理学会 秋季大会 素宇関係

佐賀大学

<http://www.jps.or.jp/activities/meetings/index.html>

9/24-25

電力技術 電力系統技術 合同研究会

大阪府立大学

<https://workshop.iee.or.jp/sbtk/cgi-bin/sbtk-showprogram.cgi?workshopid=SBW00002E71>

9/24-26

日本金属学会 秋期講演大会

名古屋大学

http://jim.or.jp/MEETINGS/2014_atmn/index.html

9/28-10/1

22nd International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Devices

Rio de Janeiro, Brazil

http://www.maglev2014.com.br/MagLev_2014_Conference_-_Rio_de_Janeiro_-_Home.html

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

10/4

日本物理学会 第 19 回久保記念シンポジウム「超電導と線形応答」
学士会館、東京都

http://www.jps.or.jp/activities/e-bulletin_2014/2014-10-04-ino-TS.html

11/5-7

低温工学・超電導学会秋季大会
福島市 コラッセ福島

<http://www.csj.or.jp/conference/2014a/index.html>

講演申込みの締め切り：9/05

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

新聞ヘッドライン (7/20-8/19)

- 東工大 超電導材料開発での失敗データ公開 日刊工業新聞 7/21
- 昭和電線ケーブルシステム 超電導と熱電発電の2研究 NEDO の省エネプログラムに採択 鉄鋼新聞 7/22
- 重さ 4 分の 1 の超電導磁石 住友電工 ハードディスク検査用 日経産業新聞 7/22
- PbFCI 型結晶構造をもつ層状性新超伝導体群開発 科学新聞 7/25
- 磁気の力で超伝導状態増強 科学新聞 7/25
- 電子材料 ビスマス系の実証試験進む・超電導 化学工業日報 7/31
- 昭和電線ケーブル 超電導線開発で先端技術大賞 日刊産業新聞 8/06
- 新会長に聞く 日本電線工業会 松本正義氏 (住友電工社長) 商慣習改善への取組み課題 鉄鋼新聞 8/13
- フラーレンで超電導線材 物材機構 冷却条件を緩和 ヘリウム不要に 日経産業新聞 8/14
- 電線工業会会長・松本正義氏 商取引適正化などへ決意 電気新聞 8/19
- 理研-NHMFL、高温超電導で共同研究契約 化学工業日報 8/19
- ロス少ない超電導直流送電 国の実証実験 工事着々 新港 石狩市は企業進出を期待 北海道新聞 朝刊 8/19

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

世界の動き (2014 年 7 月)

公益財団法人国際超電導産業技術研究センター
超電導工学研究所
特別研究員 山田 穰



★ 今月のニュース発信地

▶電力応用

ComEd 社と 5 km のケーブル試験

AMSC 社 (2014 年 7 月 16 日)

AMSC 社は、ComEd 社（シカゴを拠点とする米国最大手電力会社の 1 つ Exelon 社の子会社）が、AMSC 社の高温超電導技術を採用することに合意したと発表した。この計画は、シカゴの送電網パフォーマンスを向上させる超電導ケーブルシステム構築を目的としている。ComEd 社は、イリノイ州北部に住む約 380 万人の顧客にサービスを提供しており、これはシカゴ市を含む州人口の 70 %に相当する。国土安全保障省（DHS）科学技術局管轄のもと、Resilient Electric Grid（REG）と呼ばれるエネルギー政策では、厳しい気象災害、テロ、またその他大惨事に備え国内電力グリッドの安全を確保し、電力システムがより耐久性に優れたものになるよう、ComEd 社が主導的に取り組んでいる。

ComEd社の社長兼最高経営責任者であるAnne R. Pramaggiore氏は、「我々は、過去2年に亘ってスマートグリッドの開発及び展開を進めてきたこのプロジェクトが、一層のインフラ改善と技術向上をもたらす当然の展開であると考えている。危機的な都市インフラとこの超電導システムを結びつけることで、シカゴ中央ビジネス地区に更なる信頼性、高回復力、そして安全性が提供されるであろう。」と述べた。復興労力と費用のかかる予測不可能な大惨事に備え、現在米国の多くの都市では、電力復

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

旧できるグリッドのインフラ設計が行われている。REGシステムには、大惨事でグリッドが部分的に損失されても自己修復できる解決策が備わっている。米国最初の商業的用途としてComEd社が設置する高度技術であり、電力グリッドが直面する重要課題に対応することができる。

AMSC 社の社長兼最高経営責任者であるDaniel P. McGahn氏は、「DHSの契約でも示されているように、当社は他の米国電力会社、少なくとも2社と同様な開発計画を開始する予定である。世界には、冗長性と優れた障害回復力を有するグリッド構築に向けたスマートグリッド技術開発に数百億ドルも投資する電力会社が多く存在する。」と述べた。McGahn氏は、同社独自の高温超電導技術により、REGシステムが電力系統に不可欠なインフラ資産の保護に重要な役割を果たすものと確信している。ComEd 社並びにDHSとの提携を経て、AMSC 社は米国に加え、世界中の都市において同システムの提供を展開できる見通しである。このプロジェクトでインストールされる超電導ケーブルの長さは3マイル以上に及び、世界中で超電導技術が導入されるよう、先導的モデルとして今後その役割を果たすことになる。

Source: "ComEd to Partner with AMSC on Superconductor-based Resilient Electric Grid System"

AMSC Press Release (16 July, 2014)

Contact: AMSC Investor and Media Relations Kerry.farrell@amsc.com

<http://ir.amsc.com/releases.cfm>

Central Hudson 社に超電導限流器が導入

Central Hudson 社 (2014 年 7 月 17 日)

Central Hudson Gas & Electric 社において、Applied Materials 社で開発、製造された革新的超電導限流器が導入された。今後、電気故障が原因で起こる損傷から重要な電力設備を保護し、グリッドの効率性向上を目指す。

この超電導限流器は、ポキプシー町にある Central Hudson 社の Knapps Corners 変電所に導入された。ほとんどの変電所では現在、サーキットブレーカーが電力サージによる機器の損傷を防止している。家庭や企業への電力供給が中断されると、その対処にはしばしば予想以上の時間がかかる。この新しい超電導限流器が作動すれば、スタンバイモードで、しかもリアクターそのものよりもはるかに少ないエネルギー消費で、損失ゼロの状態で電力を送ることができる。最終的には、特定の用途向けに電力品質が改善され、電圧の安定性が備わった電力グリッドの構築につながるものである。

Central Hudson 社の技術及びシステム運営事業部副社長である Paul Haering 氏は、「我々の目標は、超電導限流器を追加することで、電力機器の寿命を延ばし、またシステムの損失を下げ、最終的には当社の電力利用顧客が負担するコストを削減することである。」と述べた。この超電導限流器の導入効果が実証されれば、世界の電力会社の間で大規模に普及する可能性があるという点で、同社はこの度のインストールが重要な役割を担っているとの見解を示している。

システムテスト並びに評価は、2014年5月から1年間にわたって実施され、性能データについては、ニューヨーク洲公共サービス委員会に提供される。このプロジェクトの総費用額は250万ドルである。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

Source: "Central Hudson deploys innovative new superconducting technology to reduce power outages caused by lightening and other surges"

Central Hudson News (17 July, 2014)

Contact: Denise Doring VanBuren, Vice President of Public Relations dvanburen@cenhud.com

http://www.cenhud.com/about_us/news/july17_14.html

▶線材

10 万アンペアの大電流導体開発

核融合科学研究所 (2014 年 7 月 25 日)

自然科学研究機構 (NINS) の核融合科学研究所 (NIFS) は、核融合炉のマグネットに適用可能な高温超電導コイルの開発において、世界最高記録となる10万アンペアの通電電流の実現に成功した。

NIFSは、日本で開発された最新イットリウム系高温超電導テープ線材を用いて、一枚あたり幅10 mm、厚さ0.2 mmの超電導テープ線材を54枚単純積層し、さらに“接続方式巻線”と呼ばれる方法によって、機械的に極めて強固な導体に仕上げることに成功した。また、大型コイルの製造に欠かせない導体接続のための低抵抗接続技術は、東北大学との共同研究で開発された。この接続方式巻線は、医療機器や電力機器に使用される高温超電導マグネットの開発にも影響を与える。

温度20 Kで行ったプロトタイプ導体テストでは、10万アンペアを超える電流が測定された。全体の電流密度は、ジャケットを含め40 A/mm²を超え、これは核融合炉用の大型超電導マグネットを製作するのに実用的である。この技術は、将来他の技術に影響を与えると予想される。

Source: "Magnets for fusion energy: A revolutionary manufacturing method developed"

NIFS Public Release (25 July, 2014)

Contact: Nagato Yanagi yanagi@LHD.nifs.ac.jp

http://www.eurekalert.org/pub_releases/2014-07/nion-mff072514.php

長尺装置導入状況

Superconductor Technologies 社 (2014 年 7 月 31 日)

Superconductor Technologies 社 (STI) は、Conductus®線材の生産機の最新情報を提供した。Conductusプロセスでの最初の2段階であるSDPとIBADの機器は既に稼働し、要件にあったテンプレートを生産している。同社の期待は今、最終段階の機器として、2014年第3四半期末にかけて運用可能となる長さ1 kmの反応性共蒸着 (RCE) 装置に寄せられている。

同社の社長兼最高経営責任者であるJeff Quiram氏は、「長さ1 kmのRCE装置は第2四半期に稼働できる予定であったものの、真空蒸着装置の製造元工場で機器の故障が生じたため、これまで遅延が発生している。真空蒸着装置は現在、8月下旬に当社オースティン工場に搬入される予定である。」と述べた。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

RCE装置の最終組み立ては、計画どおり予算範囲内で行われ、2014年第4四半期中には生産能力を急速に高め、2015年にフル稼働を目指している。同社は、年間初期容量750kmのConductus®線材の生産を見込んでいる。

Source: "STI provides an update on Conductus superconducting wire production equipment"

STI Press Release (31 July, 2014)

Contact: Investor Relations Cathy Mattison or Kirsten Chapman invest@suptech.com

http://phx.corporate-ir.net/phoenix.zhtml?c=70847&p=irol-newsArticle_Print&ID=1953464&highlight

▶デバイス

資金調達 3,000 万ドルに

D-Wave Systems 社 (2014 年 7 月 11 日)

世界初の商用量子コンピュータを開発した D-Wave Systems 社は、Goldman Sachs 社 (GS)、BDC Capital 社 (BDC)、Harris & Harris Group 社 (HHGP)、そして DFJ 社を含む新規および既存の投資会社から、更なる資金調達で 3,000 万ドルを獲得したと発表した。この資金は、同社の更なるソフトウェア構築をはじめ、潜在的なソフトウェアアプリケーションのエコシステム実現に向けて、量子コンピュータ技術の開発促進に充てられる。

同社の最高経営責任者である Vern Brownell 氏は、「コンピューティング能力の向上、進化を求める機関に最初の実用量子コンピュータを提供する際、この資金調達が、当社の能力が認められる強力な承認となる。」と述べた。この資金を受けて、同社の製品を市場に導入し、多分野にわたってソフトウェアアプリケーションの活用と展開が期待される。

この一年で、同社はグローバル市場における存在感を拡大している。資金調達を通じて、さらに全世界の専門家と重要なパートナーシップを築き、米国、欧州、アジアなどの主要市場で継続的な成長を遂げることが期待されている。

Source: "D-Wave Systems Secures \$30M (CAD) Funding to Accelerate Quantum Computing Software Development"

D-Wave Systems Press Release (11 July, 2014)

Contact: media@dwavesys.com

<http://www.dwavesys.com/press-releases/d-wave-systems-secures-30m-cad-funding-accelerate-quantum-computing-software>

超電導-シリコン Qubits

Joint Quantum Institute (2014 年 7 月 2 日)

研究者たちは、ジョセフソン接合や量子ビットなどの超電導量子デバイスを作製する方法として、“ボトムアップ型”ナノプロセスを提案している。彼らの狙いは、シリコン内のアクセプター原子(例えば、ホウ素やアルミニウム)を正確にドーピングし、量子ビットやセンサーを作る超電導線材や接合を作製することである。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

メリーランド大学及び物理科学研究所に所属するYun-Pil Shim氏とCharles Tahan氏は、豪ニューサウスウェールズ大学のMichelle Simmons氏が開発した走査型トンネル顕微鏡 (STM) による水素リソグラフィを活用して、超電導量子ビットやデバイスがどのようにしてシリコンから作製されるかを実証した。特定の原子サイトに不純物を正確に配置させるには、ホスフィンなどのドーピングガスが使用される。このSTMを用いて最近では、シリコン原子4個のうち1個の置き換えを実現する成果を上げた。ドーパント濃度は、超電導臨界電流に影響を与える、すなわちドーパント濃度が高ければ高いほど、超電導臨界温度も高くなるのである。

Yun-Pil Shim 氏は、「アクセプター原子が十分な層の上に十分な密度で配置されると、超電導領域がシリコン内に形成され、その後結晶シリコンでカプセル化される。」と述べた。またCharles Tahan氏は、「これは、ジョセフソン接合と量子ビットを作る半導体シリコンの実現性を促す最初の提案である。また、センサーや粒子検出器など他のデバイス用のシステムについても、私はその可能性を楽しみにしている。」と述べた。この研究成果は、Nature Communicationsに掲載されている。

Source: "Superconducting-Silicon Qubits"

Joint Quantum Institute News (2 July, 2014)

Contact: Phillip F. Schewe pschewe@umd.edu

<http://jqj.umd.edu/news/superconducting-silicon-qubits>

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

「ASC2014」会議報告

概要・応用分野：ISTEC 特別研究員 山田 穰
 エレクトロニクス分野：ISTEC-SRL 所長 田辺圭一
 線材・パワー応用分野：ISTEC-SRL 副所長 和泉輝郎



シャーロットコンベンションセンター



会場開会式

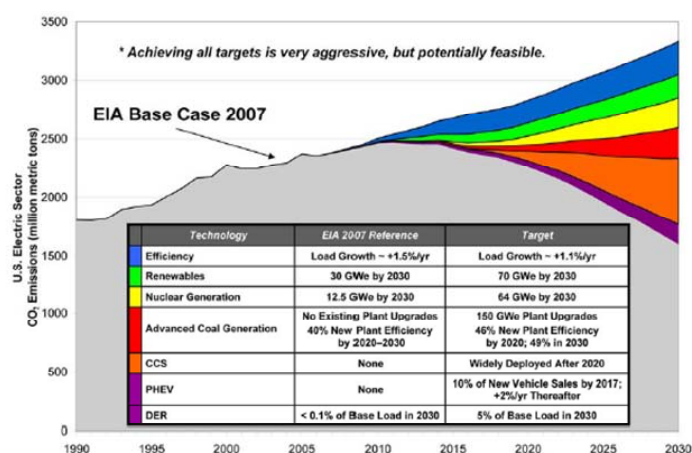
【概要・応用分野】(山田)

2014 年 8 月 10-15 日に米国シャーロット市（ノースカロライナ州）のコンベンションセンターで ASC2014 が開催された。参加者は 1500 人。シャーロットは、レーシングカー大会で有名な町とのことで、初日の開会式では委員がレーシングカーのいでたちで現れた。

それに続く、初日のプレナリーセッションでは、地元であるシャーロットの企業、Duke エナジーと EPRI から発表があった。

- Welcome to Charlotte - Duke Energy Vision - Energy Efficiency Challenge : Lee Mazzocchi (Duke Energy) & Ronald Schoff (EPRI)

本講演によるとシャーロットは今や 200 社を超えるエネルギー関連ユーティリティーがあり、その中で Duke Energy は全米一の会社とのこと。後半は EPRI の Schoff 氏の講演であったが、人口増が避けられない、かつ環境保護が重要な未来社会に、超電導技術が不可欠であるとの初日のスタートにふさわしいグローバルな視点からの講演であった。



初日プレナリーDukeEnergy, EPRI の講演“Energy Vision”から。2030 年に向けて大幅に CO₂ 排出（縦軸）が増えていくが、各種技術の進展（色つき部分）で大きく抑制できる。超電導送電はこれら全てに寄与でき、CO₂ 削減に有効である。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

応用に関するセッションでは、以下の傾向が見られた。

- ・再生可能エネルギーへの世界的な投資意欲の活発化を受けて、1)風力、2)ケーブル、3)限流器、SMES など、発電、系統に関して風力の大型化、系統保護の発表が多かった。

- ・ MgB_2 の値段の安さ、コイルの作製の容易さを受けて、 MgB_2 に関する発表が目立った。例えば、3 日目のジュネーブ大フリキカー教授のプレナリー、欧州の大型風力応用などである。

- ・ 大きなプロジェクトである欧州の AmpaCity が今年からドイツエッセン市中の実際系統で 1 km のケーブル、限流器を導入して試験を開始したのは、大きなニュースである。実際に夜中に街中の道路を工事し、敷設している様子が発表されたが、実用化間近と思わせた。ケーブル線材は住友の Bi 線。

- ・ AMSC 社の ComEdison のケーブル試験（初日 AMSC's Resilient Electric Grid System で講演）。本会議直前に新聞発表もあったが、60 億円をかけて 4-5 年間で約 3 マイル (5 km) のケーブルをシカゴに敷設するものである。"The contract could be worth about \$60 million to American Superconductor over a four- to five-year period."

現在の市中ケーブルの老朽化と相まって、DHS (国家安全省) は、近年の災害あるいはテロに対してより強固で弾力性のある電力網を超電導のいわゆる "Resilient Cable" で築きたいとの意向である。"The current design of the grid infrastructure in many US cities makes restoration of power after a catastrophic event such as a hurricane or a terrorist event "time-consuming, costly, and unpredictable." 発表者の AMSC 社 Ross 氏は、今後、実行する中で何が一番大変かと聞かれて、“建設作業”と答えていた。AmpaCity と同様であるが、これもいよいよ実用を考える段階に来ているのだと思わせるコメントであった。"The ComEd installation would be the first commercial application of this advanced technology in the United States."

- ・ SupraPower MgB_2 線による風力 10 MW 超の大型化検討。風力などの欧州主要企業が参加し、Technolia 社 (スペイン) が全体をまとめている。値段の安さ、また、軽量化 (MgB_2 は軽元素材料を使っているのだから軽い) で MgB_2 を選択したとのこと。

- ・ 新たにオーストラリアから Guina 社が風力ほかを発表。全部で 6 件も発表しており、これも再生可能エネルギー関連に超電導の R&D が広がっているためかと思われた。

- ・ 接続 多数 特に、韓国勢多し。 MgB_2 ではジーメンスが機器 (MRI) に使えるレベルを達成。

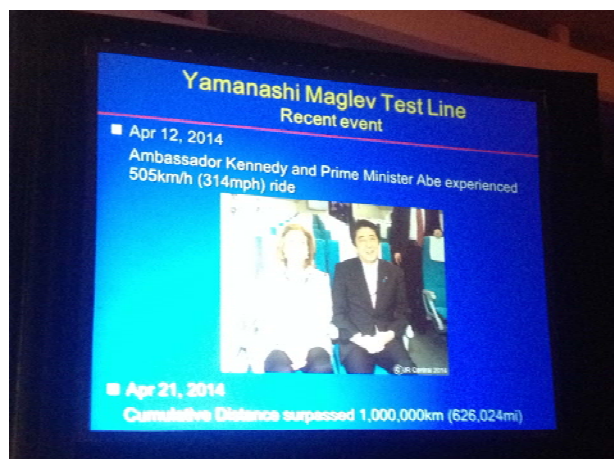
- ・ 絶縁無しコイル (通称 NI (Non Insulation) コイル) に関しても多数の発表があった。絶縁が無いと、コイル電流密度が倍以上に上がるので重要。ただし、絶縁は大丈夫か、クエンチ時はどうなるか、大型大電流コイルでは焼損しないかが今後の開発焦点。

- ・ 高磁場コイル: プレナリーセッションでも「フロリダでの高磁場コイルとその R&D」が紹介されたが、さらに高磁場を目指して開発が活発化している。3 日目の高磁場 NMR セッションでは、MIT の岩佐氏の「絶縁無しコイルは NMR(MRI)には必須、この技術無しでは進まない」とのコメントに対し、理研の前田氏の発表では「REBCO 線材コイルは遮蔽磁場の観点から相当難しいのでは」と好対照の見解を示した。磁場均一度の精度が高くなるとこの遮蔽の影響は大きくなるので、REBCO 線にとって細線化などの技術は重要となる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

・最終日プレナリーセッションで、JR 東海の米国社からリニアの現状と歴史を発表。一同、開発と実際社会インフラになるまでの遠さを実感。器ができて、それから政府、住民、建設などとのコンセンサス、安全、環境配慮などやることは、多数であることを実感。営業時の切符の値段はいくらかの質問があったが、今の新幹線より、10 %アップ位。Reasonable でしょうとの返答。



JR 東海のリニア講演：今年 4 月の阿部首相とケネデ大使のリニア試乗の様子と試験走行実績が 100 万 km を超えたとの報告（スライド下部）。

その他： 業者展示ブースは 40-50 社はあり、かなり盛況であった。線材会社も多数出展していた。AMSC、SuperPower（古河ー白坂社長も出席）、住友（米国社が担当展示）、フジクラ、Bruker、Advanced Conductor Tech.社（ごく最近できた REBCO 丸線のケーブル会社）、MgB₂ の Columbus（イタリア。月に 10 km 供給可とのこと）、HyperTech（米国）など。各社、従来よりも、一層パンフなどを充実して、販売に力を入れている様子が明らかだった。

【エレクトロニクス分野】（田辺）

エレクトロニクス分野の全発表件数（アブストラクト投稿件数）は 4 件の基調講演を含め約 400 件で、その 4 割弱の 155 件が検出器関係、次いで SQUID 関連の 67 件、デジタル及び Mixed Signal 62 件、Qubit 関連 48 件、素子プロセス及び材料関連 44 件、マイクロ波デバイス 23 件という内訳であった。今年（2014 年）は SQUID 発明 50 周年記念の年ということで、特別セッションが設けられた。

デジタル分野での最大のトピックスは、超低消費電力の超電導コンピュータ実現を目指す IARPA の C3 (Cryogenic Computing Complexity) プログラムの受託者が決まりスタートしたことである (IARPA の Manheimer の講演、8/13 の基調講演で HYPRES の Mukhanov も講演)。

現在最高性能のハイエンドコンピュータ（中国の Tianhe2、34 PetaFlops ; 1 秒間に 3.4 京回の浮動小数点演算）の消費電力は約 20 MW であり、1 ExaFlops (1000 PetaFlops) のコンピュータ実現には低消費電力化は必須である (1 ExaFlops で 20 MW が DOE の目標)。超電導プログラムでは、20 PetaFlops で 80 kW という DOE 目標のさらに 1 桁以上低消費電力のコンピュータ実現を最終目標としている。まず 3 年間のステージ (Phase 1) では、半導体コンピュータの課題を解決するコンピュータが構築可能かどうか、また大きな優位性があるかなどの見通しを得ることを目標とし、

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

具体的には、超電導コンピュータに対する大きな技術課題であった高速メモリ開発、論理回路の大規模（複雑）化、MCM などのシステム化技術開発、高度作製プロセス構築などに取り組んでいる。

米国の超電導コンピュータ開発といえば、1970 年代後半から 83 年までのラッチ型論理回路を使った IBM のプロジェクト、90 年代後半の SFQ（あるいは RSFQ）論理を用いた HTMT プログラムがあったが、本プログラムでは、SFQ 回路の一種であるが、RSFQ 論理回路での主たる電力消費の発生源であったバイアス抵抗等での静的電力消費を排除した新世代の低消費電力論理回路の大規模化を目標としている。論理回路を担当する受託者は IBM（および HYPRES）と Northrop Grumman の 2 社で、それぞれ eSFQ/ERSFQ 回路、RQL（Reciprocal Quantum Logic）回路の開発を行う。最大の課題の一つであったメモリについては、Raytheon BBN と Northrop Grumman の 2 社が受託し、複数の大学と共に種々の低温 MRAM や超電導 MRAM を主体としたメモリを開発しており、そのデコーダやドライバには eSFQ/ERSFQ 回路や RQL 回路を用いる。Nb 集積回路プロセスについては、MIT Lincoln Lab.が開発し、ファンドリとしての機能を果たすことになっている。すでに Nb 8 層の完全平坦化積層プロセス及びサブミクロン（0.5-0.7 μm 直径）の高 J_c （10-50 kA/cm^2 ）接合作製技術を開発している（最終目標は Nb 10 層）。C3 プログラムの予算は、非公式情報であるが 100 M\$規模ということである。超低消費電力 SFQ 回路の開発に関しては、名大、横国大など日本からも多くの発表があった。

SQUID 応用分野では、LANL の Espy が脳などの生体イメージング用の超低磁場 MRI システム開発の進展について報告した。磁気シールドレス化を目指し、地磁気キャンセルのための 3 軸ヘルムホルツコイルや部屋の壁に過渡的に流れる渦電流を補償するためのコイルを備えたシステムを開発している。シールドレスシステムで $3 \times 3 \text{ mm}^2$ 程度の空間分解能を得ているが、分極磁場をさらに上げたり、分極磁場の立ち下がり時間を減少させるなどの改良が必要であると述べた。Chalmers 大の Xie は、高温 SQUID と低温 SQUID を用いた脳磁計の性能比較について報告した。高温 SQUID は低温 SQUID システム（102 ch 脳磁計）に比べ磁場ノイズは大きい、クライオスタット先端からの距離を 1 mm 程度にできるという利点がある（低温システムでは 20 mm）。その結果、浅い位置にある磁気モーメントに対しては、より高い S/N 比で測定できる。Colorado 大の Huber は、走査型磁気顕微鏡用のナノメータサイズのチップ上 SQUID の作製について報告した。石英のマイクロピペットの先端に両側から Al, Pb や Nb を蒸着することにより、ループ径が 50-200 nm の dc-SQUID を作製している（JJ はナノブリッジ）。また、3 接合からなる SQUID (θ -SQUID) を作製し、ナノワイヤ上の電流が作り出す磁場の垂直、水平 2 成分のクリアなイメージを得ていた。IPHT Jena の Stolz はフルテンソルグラジオメータシステムを用いた地磁気異常の探査について報告した。Nb 系平面型グラジオメータの寄生マグネトメータ成分によるバランスのずれを、同一基板上に集積した 3 軸の基準マグネトメータを用い補償することで、 10^4 という高いバランスを実現している。このセンサーを複数冷却したクライオスタットを GPS、レーダー高度計、データ受信機等と共に搭載したヘリコプター牽引用のシステム（機体）を開発して用いている。また、2012 年頃から高度なデータ処理技術も開発を進めている。このシステムの開発には資源 3 大メジャーの AngloAmerican とダイヤモンド資源会社の De Beers の継続支援を得ており、2013 年にはこれらの会社とその性能が認められ、今後 2, 3 年間排他的にその資源探査に用いられるようである。CSIRO の Foley は航空機搭載をねらいとした高温 SQUID を用いたテンソルグラジオメータの開発について報告した。以前に開発したシステムの問題点を解決し、コンパクト化を図るため 1 個の平面型グラジオメータをある角度を付けて回転（12 Hz 程度）する方式を採用した。

SQUID 発明 50 周年記念セッションでは、まず Ford 研究所で SQUID 発明に関わった Silver が、その後の SQUID をベースとしたラッチや SFQ などの論理回路、量子コンピュータの開発の進展に

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

について話した。UC Berkeley の Clarke は、磁束量子化やジョセフソン効果の発見に続いた SQUID の発明から、Nb 系薄膜集積型 SQUID の開発、MPMS や鉍物用磁化率計、資源探査装置、MEG などの製品開発、宇宙観測望遠鏡の検出器用 SQUID アンプ・読み出し回路開発、重力波や Axion の検出への応用、超低磁場 MRI システム開発など広範な応用について紹介した。Leidos, Inc. の Fagaly は SQUID の市場開拓について講演し、1980 年以降の市場は 840 M\$ 程度と述べた。九大 Enpuku の SQUID と磁気マーカーを用いた免疫検査装置、磁気粒子イメージング技術開発の紹介に続き、IPHT Jena の Stolz は SQUID の地球物理、資源探査への応用について講演した。低温 SQUID と高温 SQUID を用いた TEM 装置を開発し、20 台以上が世界で使われていることを紹介した。次の開発課題としてより高分解能なシステムの開発(例えばよりビット分解能の高い超電導 ADC の利用)、航空機搭載システムの開発、海底資源探査用の潜水艦搭載システムや地下坑内応用システムの開発などを挙げていた。最後に、Stanford 大の Irwin が TES と SQUID アンプを用いた宇宙背景輻射の分極の観測など、宇宙のインフレーションの科学に迫る取り組みについて紹介した。

検出器関連では、Caltech の Zmuidzinas が基調講演で、Herschel 望遠鏡や ALMA プロジェクトなど超電導検出器の天体物理や宇宙学への応用について紹介した。量子情報通信の超電導単一光子検出器 (SSPD) についてはアレイ化の開発が進められており、アレイ化に対応した SFQ 信号処理回路の開発も報告された (NICT の Terai)。量子ビット関連では、UCSB の Martinis が基調講演で誤り補正機能をもつ量子コンピューティング実現に向けた取り組みについて紹介した。UCSB では Xmon と呼ぶ AI 薄膜で作製した SQUID とキャビティを組み合わせた qubit を 5 個結合させた回路を開発し、その正確さ (fidelity) として 0.994 と、イオントラップ qubit (2 bits) と同等の値を得ている。Qubit の 2D アレイを用いたエラー補正方式についてのアイデアはあるが、その検証にはコヒーレンス時間を現状 (20-40 μ s) の 5 倍程度にし、立体回路構造を開発するなどの多くの課題があると述べた。この分野は着実に進展しているようではあるが、現実的な長いアルゴリズムのテストには 1000-1000 qubit の集積と誤り補正が必要で、まだまだ先の長い開発が必要のようである。

【Y 系超電導線材】(和泉)

ASC2014 における Y 系超電導線材開発に関する動向についてまとめる。

長尺線材製造技術に関する報告としては、従来から 500 m 以上の作製能力を持っている 5 社 (フジクラ、SuNAM、SuperPower、amsc、昭和電線) の中からも進展が報告された。まず、フジクラ (Dr. Iijima : 日本 : PLD/IBAD) は、昨年、製造工程の改善を図り、1 km を超える長さで均一な特性 (~ 570 A/cm 幅) を有する線材を作製することに成功したことを報告した。これまでフジクラが保持していた $I_c \times L$ の記録を伸ばすもの (~ 600 kAm) で、世界でトップの長尺線材作製能力を更に進めたことになる。ちなみに、2 位は今回の ASC での報告はなかったが、4 月末にトルコで行われた ICSM2014 で報告された SuNAM 社 (韓国 : RCE-DR/IBAD) の 978m x 579A/cm 幅=566 kAm である。

上記の、5 社以外には、これまで追随する企業としては Bruker 社 (Dr. Usoskin : 独 : PLD/ABAD) であったがしばらく更新しておらず、今回の学会でも 120mx300A/cm 幅で大きな進展は見られなかった。また、STI (Dr. Huh : 米 : 共蒸着/IBAD) から長尺設備導入 (単長 1 km・年間製造能力 1000 km) の報告はあったが、線材の現状レベルは 50m-500A/cm 幅に留まっていた。そんな中、新しい勢力が二つ現れた。一つは、ロシアの企業で SuperOX である。PLD/IBAD を採用し、数年の間に長尺線材の高性能化、長尺化に成功し、今学会では 500mx>400A/cm 幅 (Dr. Petrykin : 露) で $I_c \times L > 200$ kAm を達成したと報告している。ちなみに、同社は資本がロシアで同国にも施設は保有しているものの、今回の成果は日本事業所 (相模原) で達成したものである。更に、注目すべき新勢

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

力としては中国の上海交通大学のグループの成果である。このグループは、配向金属基板と IBAD を比較しつつ超電導層は PLD で形成する手法を取り、最近 IBAD に選定して成果を挙げている。短期間のうちに、100 m-500 A/cm 幅の高特性線材の作製に成功したことを報告し、これまで Y 系超電導線材の作製プロセスを検討する機関を持たなかった中国から出た動きとして注目すべきトピックスであり、今後の進展を注目したい。特筆すべきは、新興 2 機関は何れも PLD/IBAD を選定している点である。IBAD は高速化が実現できたことでコスト問題から解放されていることから理解できるが、PLD 法は高特性が得られるが高コストのイメージが強かったものの、レーザー業界の技術進展と超電導層形成技術における高速化、高収率化でコストに対しても競争力がついたと考えることができることを示しているかもしれない。図には、模式図で長尺線材開発における世界の動向をまとめた。

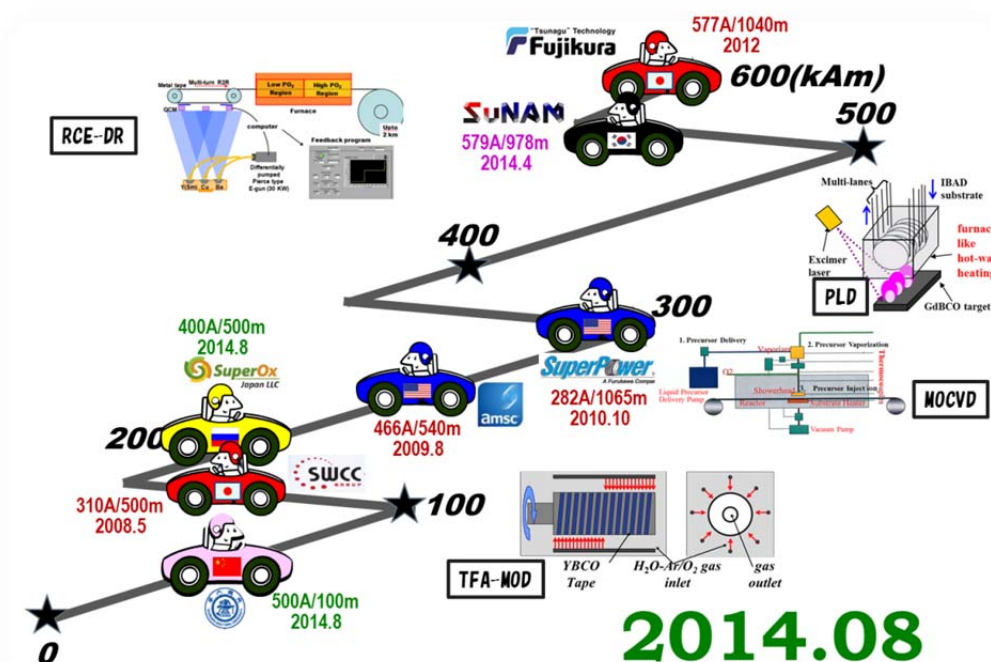


図 本学会終了時における長尺線材開発競争を表した模式図

次に、磁場中特性向上技術に関する報告をまとめる。まず、筆者が、ISTEC の成果として、PLD/IBAD 線材において EuBCO+BHO の組み合わせで厚膜での磁場特性で世界最高特性(141A/cm 幅@77K, 3T、616A/cm 幅@65K, 3T) を達成したことを報告した。また、この技術を用いて長尺化を実現し、94 m 長線材で >500A/cm 幅@65K, 3T を紹介した。気相法では、ヒューストン大学 (Prof. Selvamanickam : 米 : MOCVD/IBAD) から MOCVD 膜内に高濃度に Zr を添加する手法で磁場中特性の向上に成功した成果が報告された。ここでは 15 % という高濃度の Zr を添加し、30 K、3 T (B//c) の下で 2413 A/cm 幅の高い I_c を実現し、改善率 (ARPA-E プロジェクト開始時特性に対する向上比率) として 4.4 を達成している。但し、ここで注意すべきは、上記の特性は B//c における特性で、必ずしも磁場角度依存性における minimum 値ではない点である。コイル等の応用では、B//c 以外にあらゆる角度からの磁場を経験することから応用からの補償値としては I_c (min.) が重要であると考えられる。ちなみに、上記の線材は、minimum 値では 1743 A/cm 幅となり、前述の ISTEC の最高線材 (EuBCO+BHO) の同条件の値 (I_c (min.) = 2730 A/cm 幅@30K、3T) に比べては小さい値と

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なっている。その他の気相法における磁場中特性にかかわるトピックスとしては、Bruker 社 (Dr. Usoskin : 独 : PLD/ABAD) が、PLD 成膜において圧力誘起型の組成変動起因の Intrinsic 型とロッド形状の Extrinsic 型の同時導入により 4.2 K における磁場中特性向上を報告している。また、フジクラ (Dr. Iijima : 日本 : PLD/IBAD) は、前述の 1 km 長尺線材 (人工ピン導入はしていない) の磁場中特性評価の結果として 30A/cm 幅@77K、3T 及び 180A/cm 幅@65K、3T の値を報告している。

次に、低コストプロセスとして開発が進められている TFA-MOD 法における磁場中特性向上の試みとしては、筆者が ISTEK と昭和電線との共同で開発 (日本 : TFA-MOD/IBAD) している BZO 導入プロセスにおける成果を報告した。超電導層形成熟処理中に比較的低温で等温保持工程を加えることで BZO の微細均一分散化を進めることに成功し、磁場中特性を向上できることを報告し、124 m 長線材で 50A/cm 幅@77K、3T の高い磁場特性を得たことを紹介した。一方で、長い間この分野での活動が報告されていなかった amsc 社 (Dr. Rupich : 米 : TFA-MOD/RABiTS) から最近の成果の紹介があった。詳細の説明は、殆ど行われなかったが、30 K、5 T で 1000 A/cm 幅以上という高い I_c 値を報告した。技術の内容を合わせて今後の動向を注目していきたい。

更に、今学会で評価技術として興味深い報告があった。九州大学 (Prof. Kiss : 日本) からの報告で、長尺線材の特性を評価するにあたって、特性の変動の周波数解析を行い 1/f の要素を見出し、大きなイレギュラーな欠陥を除いた後の線材で I_c のばらつきの最低値で支配される長尺特性を評価する手法として、ワイブル解析を提案している。10 m 程度の線材の特性評価結果に基づいて長尺線材の特性を予測するものである。線材の作製プロセス、作製条件により変化する状況を反映し、長尺線材の I_c 保証値的なものを示す手法として有効であると考えられる。早速、Bruker 社が取り入れて解析していた。

また、最近脚光を浴びている超電導—超電導接合に関して韓国大学 (Prof. Lee) から報告があった。殆どは、これまで他所で報告されている内容であったが、Discussion の中で、再現性がまだ低い課題が明らかになった。具体的には、50 % 以下であるとのことで、その原因は、表面状態にばらつきが多いことであるとのことであった。更に、やはり接合部の磁場中特性は低下していることが報告されていた。また、接合部の配向関係は微細組織観察をまだ行っていないとのことで不明であった。

コイル化技術としては、フジクラが興味深い結果をポスターで発表していた。詳細は特許等の関係で明らかにできないが、現状線材を用いてテープへの特別な処理をせずに含浸しても特性を低下させない手法を開発したとのことであった。技術の内容に興味があるところである。

更に、Plenary Lecture で Prof. Chiesa (Tufts Univ.) が、様々な高磁場応用における線材選定の話の中で、低温磁場中特性の観点から現状での候補は Bi2212 線材と Y 系超電導線材であるが、後者は「丸線化」と「特性異方性改善」であると結論付けている。同様に、Prof. Larbalestier (Florida State Univ.) がパネルディスカッションで Y 系超電導線材は丸線で多芯化ができれば応用への適用が大きく広がると指摘していた。更には、理研の前田氏は、NMR 用線材の検討結果を報告し、Y 系超電導線材は、磁場中特性が非常に魅力ではあるが、遮蔽電流対策としてフィラメント化ができないと使えない。できれば、有効であると指摘していた。これらは、今後の線材開発の方向性を示す発表として重要であると考えられた。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【隔月連載記事】

高温超伝導電力機器の冷却技術（その 5）

大陽日酸株式会社

開発・エンジニアリング本部

つくば研究所長 吉田 茂

5. 冷凍機利用（クローズドサイクル）冷却システム

前回は、サブクール液体窒素を生成する方法として液体窒素の減圧を利用する方法を紹介した。この方法はオープンサイクルとも呼ばれ、液体窒素を消費するので、絶えず液体窒素を供給し続ける必要がある。そこで、液体窒素の補給を必要としない冷凍機を利用したクローズサイクル方式の冷却システムを今回は紹介する。まずは、小規模実験で利用される小型冷凍機（GM 冷凍機）を利用した小型システムを考察し、次に実用規模である冷凍能力数 kW 級の冷凍機を利用した冷却システムを俯瞰してみる。

5.1 小型冷凍機（GM 冷凍機）を利用した冷却システム

GM 冷凍機を用いた小規模実験用の冷却システムの概略図を図 5-1 に示す。このシステムは GM 冷凍機を用いて直接液体窒素を冷却することにより 65 K のサブクール液体窒素を生成する装置である。冷却源として GM 冷凍機を利用しているので、このシステムの冷凍能力はせいぜい 100～200W@65K 程度である。生成されたサブクール液体窒素はポンプによりシステム内を循環し、高温超電導機器を冷却する。このようにサブクール液体窒素は、常に冷凍機により連続冷却されるので、システムの長期連続運転が可能となる。冷凍機冷却を用いたときに注意すべき点は、液体窒素が 63 K で固化してしまうことを認識しておくことである。液体窒素を固化させないためには、冷凍機の冷却端を温度制御する必要がある。本装置では、冷凍機冷却端に電気ヒータを設置し、温度調節機構により 63 K 以下になることを防いでいる。

また、本システムは熱交換ユニット及びクライオスタット内の液体窒素を大気圧の窒素ガスで加圧し、サブクール液体窒素を生成している。大気圧の窒素ガスと 65 K 液体窒素の境界面で“ガスの凝縮”が危惧される。

しかし、低温液化ガスは、“成層”と呼ばれる独特な現象により、液相とガス相の界面での凝縮を抑制している。すなわち、窒素ガスと液体窒素との間に急峻な温度勾配を持った成層と呼ばれ

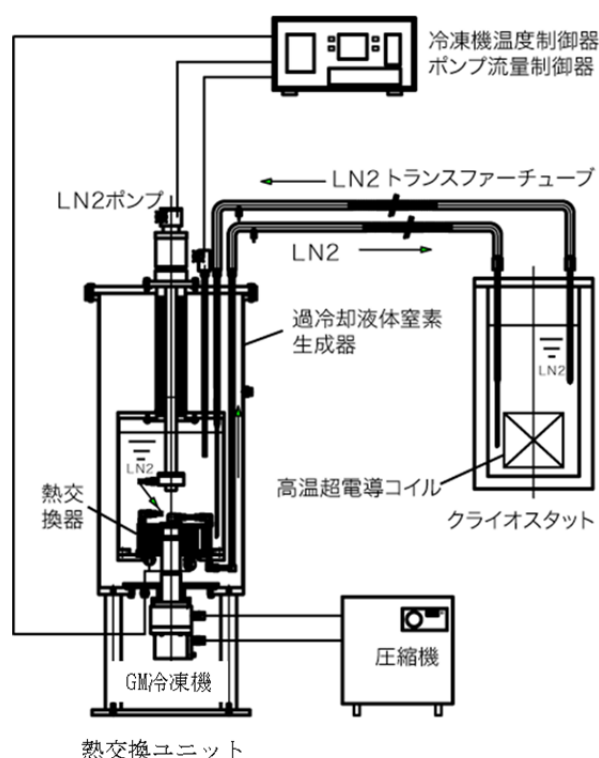


図5-1 冷凍機冷却式小規模サブクール液体窒素循環システム

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

る液体窒素の薄い層が形成され、成層部上部（窒素ガスとの境界面）は飽和液体温度（77 K）、成層下部は65 K のサブクール液体窒素となる。この層の存在により、大気圧の窒素ガスと65 K の液体窒素が分離され、システム内に安定した大気圧サブクール液体窒素を循環させることができる。

上述はサブクール液体窒素による冷却システムの例であるが、小型冷凍機（GM冷凍機）を用いた更に温度の低い冷却システムにも触れておく。先に述べたが液体窒素は63 Kで固化してしまうので、これより低温では液体窒素の循環冷却システムは困難となる。そこで、窒素よりも凝縮温度の低いネオンを利用して30 K程度の循環冷却システムも考案されている。図5-2に一例を示す。サーモサイフォンを利用してGM冷凍機の冷熱を回転体の冷却に利用している。このシステムに於いて、冷却室での有効な気液分離（冷却室外周部に液体、中心部にガスが分離）を生じさせるためには十分な回転速度が必要となる。また、小型GM冷凍機の利用という観点では、現在よく活用されている伝導冷却方式により、HTSコイルを冷却する方法もある。どの方式を採用するかは、それぞれの長所・短所を熟考したうえで判断しなければならない。

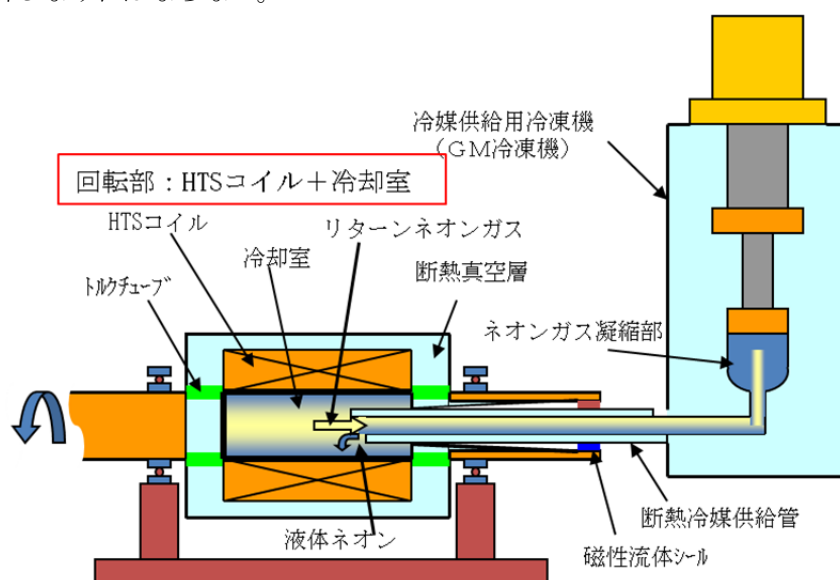


図5-2 サーモサイフォン冷却方式

5.2 大規模実験用冷却システム

HTSケーブルの実用化などでは必要冷凍能力が10～20kW@70Kと言われている。そこで大容量化が容易でメンテナンスフリーが期待されるターボブレイトン冷凍機が注目を集め、現在各所にて開発が進められている。一方、これまでのHTS 機器フィールド試験では、HTS機器冷却用ターボブレイトン冷凍機の市販品がなかったため、比較的冷凍容量の大きなスターリング冷凍機が採用されてきた。

5-2-1 スターリング冷凍機を用いた冷却システム

ターボブレイトン冷凍機が市販される以前は、冷凍能力が約200 W @ 77 K 以下であるGM冷凍機に比べて、スターリング冷凍機は1台で約1 kW (@77 K) の冷凍能力が得られるので、大型の実験やフィールド試験に用いられてきた。図5-3にHTSケーブルのフィールド試験に使われているスターリング冷凍機を用いた冷却システムの概略フローを示す。本冷却システムではスターリング冷凍機6台を用いて、2台を直列に繋ぎ1列とし、これを3並列で接続したフローとなっている。この冷却システムで三心一括型超電導ケーブル（66 kV、200 MVA級、長さ約240 m）を冷却している。運用は並列設置された2列が通常運転を行い、1列はバックアップとなっている。また、フロー図に示されている

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ように液体窒素の循環ポンプも2台用意されており、通常は1台のみの運転を行っている。液体窒素ポンプは数千時間ごとにメンテナンスが必要となるが、交互運転によりポンプのメンテナンス中でも冷却システムが稼働できるようにしている。尚、本件の詳細は東京電力のホームページから確認できる。
(<http://www.tepco.co.jp/corporateinfo/company/rd/superconduct/superconduct3-j.html>)

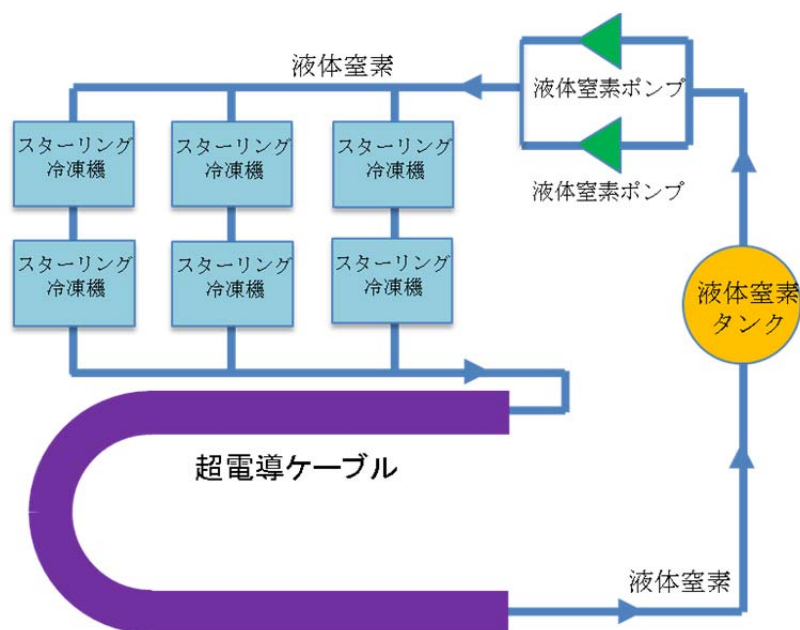


図5-3 超電導ケーブル冷却システム概略フロー図

スターリング冷凍機を用いて、循環液体窒素を冷却する場合には、スターリング冷凍機のコールドヘッド部分にサブクール熱交換器（液体窒素が流れる流路を持ち、液体窒素を冷却する熱交換器）を設置する。この熱交換器に液体窒素ポンプで液体窒素を送液し、冷却後HTSケーブルへ循環させる。スターリング冷凍機のコールドヘッドの温度制御は、冷凍機のON-OFFで行うことが一般的である。スターリング冷凍機を複数台用いるときは、連続運転する冷凍機と冷凍能力調整用にON-OFFする冷凍機が決められているようである。このタイプの冷却装置では、スターリング冷凍機のコールドヘッド寸法が比較的小さいので、液体窒素との熱交換器に十分な伝熱面積を確保することや、熱伝達係数を大きくする等の工夫が必要である。

また、オランダのスターリング・クライオジェニックス社では、スターリング冷凍機を液体窒素液化器として利用した液体窒素の循環冷却システム（図5-4）を市販している。以前紹介した液体窒素のオープンサイクルでは、排気ポンプにより液体窒素を減圧し、65 Kの飽和液体窒素を生成していたが、当システムではスターリング冷凍機による再液化により連続して65 Kの飽和液体窒素を生成している。循環するサブクール液体窒素は、オープンサイクルと同様に飽和液体窒素との熱交換にて生成している。当システムは、実績のあるスターリング冷凍機窒素液化装置を応用したものであり、冷凍機コールドヘッドでは凝縮熱伝達を利用しているので、比較的小さな熱交換器で効率よく冷熱を伝達することができる。しかし、別途サブクール液体窒素と飽和液体窒素との熱交換を行うサブクーラーが必要であり、このように二段階の熱交換を介しているため全体的な冷却効率は若干劣るようである。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

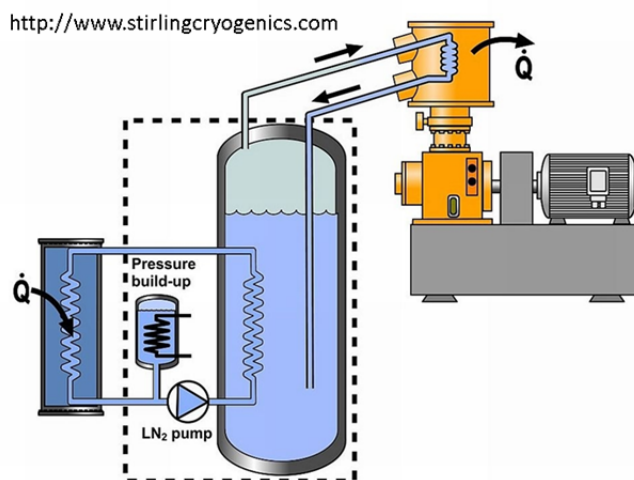


図5-4 スターリング社製サブクール液体窒素循環装置

5-2-2ターボブレイトン冷凍機を用いた冷却システム

ブレイトンサイクル冷凍機において、圧縮機と膨張機に回転機器を用いた冷凍機を特にターボブレイトン冷凍機と呼称している。ターボブレイトン冷凍機は、圧縮機・膨張機ともに磁気ベアリングを採用することにより、機械的な摺動部を持たない冷凍機となっていることが大きな特長であり、長期間のメンテナンスインターバルが期待されている。図5-5に2 kW級ターボブレイトン冷凍機の写真を示す。膨張機と圧縮機の回転シャフトは、磁気力により中空に浮上した状態で高速回転（膨張機：72,000 rpm、圧縮機：36,000 rpm）をしている。また、本冷凍機は、作動ガスとしてネオンガスを採用している。液体窒素を冷却するためには動作温度が65 K以下となるので、膨張機の安定運転を考えると、その温度域で液化しない作動ガスが必要となる。この条件に合うガスはネオン、水素、ヘリウムとなるが、この中でネオンが最も分子量の重いガスである。回転機械から見ると、同じ性能を出すためには分子量の重いガスほど回転速度が低くなるので、ネオンガスが有利となる。

ところで、ネオンのような単原子分子の断熱圧縮は圧縮熱が大きく、冷却の問題が顕在化してくる。所定の圧力比を1段で圧縮する場合は、さらにモータの回転数を増加させるため、モータ自身の発熱も大きくなり、圧縮熱との重複による圧縮機本体の温度上昇が懸念される。そこで、本冷凍機の圧縮機は2段圧縮機構とし、且つインタークーラー付きの構造となっている。

また、ターボブレイトン冷凍機で液体窒素を冷却する場合には注意が必要である。スターリング冷凍機の吸熱過程は等温過程であり、所謂コールドヘッドは温度一定である。そのためコールドヘッドの温度を電気ヒータ等で一定に制御すれば、サブクール液体窒素循環系内で液体窒素が固化することはない。一方、ターボブレイトン冷凍機の吸熱過程は等圧過程なので、作動ガスであるネオンガスの膨張機出口温度は液体窒素の凝固点より低い温度となっている。従って、この冷却ガスと液体窒素を単純に熱交換させると、ネオンガス～液体窒素熱交換器（サブクーラー）内にて液体窒素の固化が生じ、循環ラインの閉塞により液体窒素の循環に支障を来す危険がある。そこで、サブクーラーのネオンガス流路はループ経路等の工夫がなされて、液体窒素の固化を防止している。

図5-5の冷凍機はコールドボックストップフランジ上に膨張機を設置し、サブクーラーもコールドボックス内に収納している。また、ターボ圧縮機とコールドボックスを一つのベース上に配置し、パッケージ化したコンパクトな設計となっている。

フロー図には記されていないが実際の冷却システムでは、冷却系のベース圧力を設定する圧力調整装置、初期冷却用の液体窒素タンク、予冷時の液体窒素バイパスライン等の設備が必要となる。場合

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

によっては緊急時対応の冗長設備を考慮することもある。特に電力機器用の冷却システムには、十数年から数十年に及ぶ運転信頼性が期待されているが、何れの冷却システムにしても長年に亘る運転信頼性を実証したものはなく、冗長性の検討は頭の痛い問題である。

(つづく)

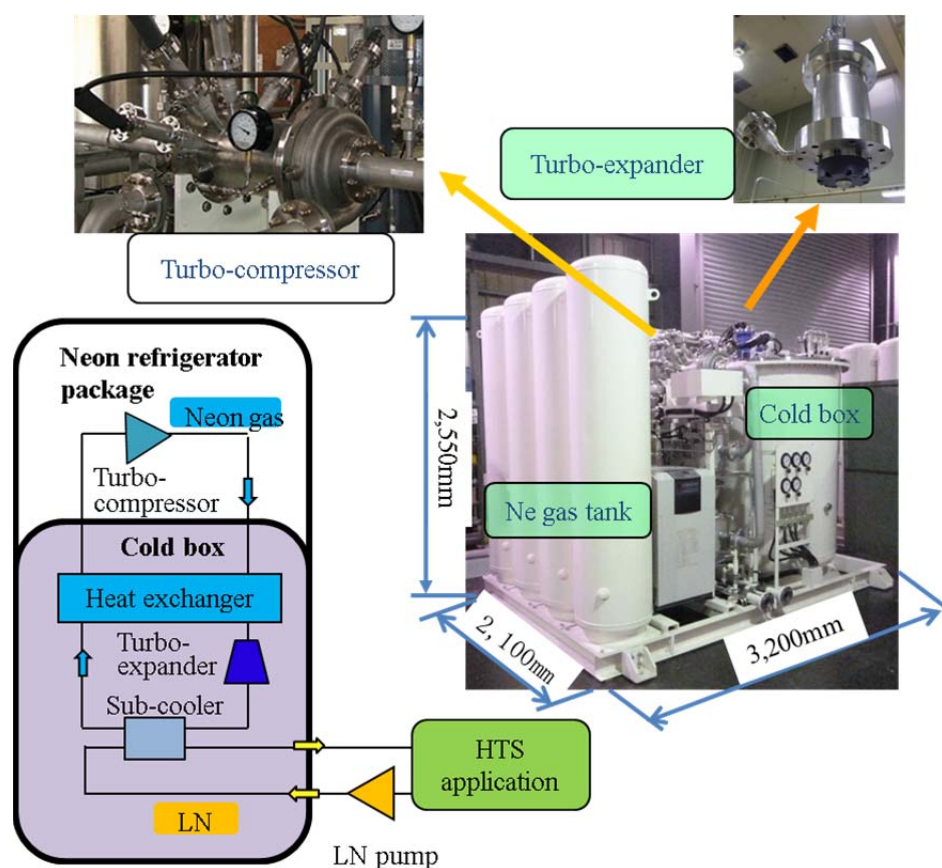


図 5-5 パッケージ型 2kW ターボブレイトン冷凍機

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

【連載記事】

やさしい電力系統のはなし (第 8 回)

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
常務理事 渡辺 勉

さて、今回は電力系統流通設備のうち変電設備の解説をします。
なお、変電設備は電圧を変換する設備を指し、発電所、配電設備、需要家設備にもありますが、ここでは変電所について解説します。

○変電所の基本機能

変電所には次の様な機能があります。

①電力系統電圧の変換、②電力系統の運用変更 → 有効電力調整、③無効電力電流の調整、④電力系統設備事故の除去、⑤電力系統状況の把握 (計測設備の設置) 以下に各機能のポイントを説明します。

①電力系統での電圧変換

電気を発電設備から需要へ送る際その量や用途に応じた電圧レベルがあります (第 6 回解説)。変電所は、それらの電圧に変換する設備 (変圧器) を置き適正な電圧を発生させます。交流の場合、電流を巻き線に通し磁界を発生させ、違う巻き線にその磁界を作用させると巻き線の巻数比に応じ電圧が発生し電力を流せる不思議な現象があり (図-68)、変圧器はこの現象を効率的に行われる様設計されます。

(余談) 電磁界の不思議

磁界は真空でも生じ、「全く何もなくても」大きな電気エネルギー伝わせます。なぜ「何もないところを伝わるのか」不思議に思うのですが、「場」と呼ばれるイメージしにくい理論で電気に関する様々な理論が導かれ、様々な技術へ応用されています。「そもそもの大本は良く理解できない」のに、それを前提として「ものごと」が進む状況が世の中には結構あります。

なお、直流の電圧変換は、特に高電圧の場合は変換ロスが大きいため、交流のように何回にも分けて行いません。一般的に交流高電圧に変換し直流化・送電・交流高電圧に変換し交流側で高電圧を低電圧に変換します。(図-69)

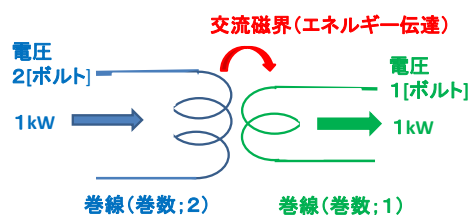


図 68 変圧器による電圧変換の基本イメージ

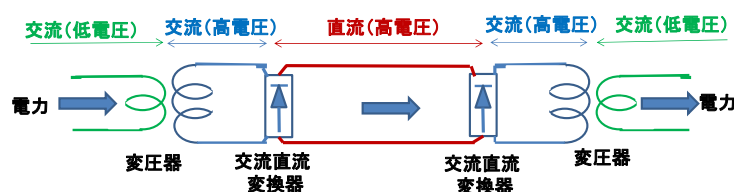


図 69 直流設備と交流電圧変換の組み合わせイメージ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

②電力系統での運用変更

変電所は、電力が変圧器や送電線へ流れるいわば交差点となります。また、各送電線、変圧器にブレーカー（Circuit-Breaker：以下 CB）が設置され電力を流したり止めたりします。（図-70-(a)）ここで変電所の中心点が使えなくなると全ての送電線、変圧器は機能停止するので（図-70-(b)）、母線（英語 Bus-bar：バスバー）を設けます。母線の形（方式）は種々ありますが、取り敢えず個人的に慣れ親しんでいる 4 母線 4 バスタイ CB 方式（図-71）（*日本では一般的に「ブス」となまり？ます）方式で電力の流れを調整する運用変更機能を説明します。

母線を設けると機能停止しにくくなることを、図-72 で確認していただければと思います。

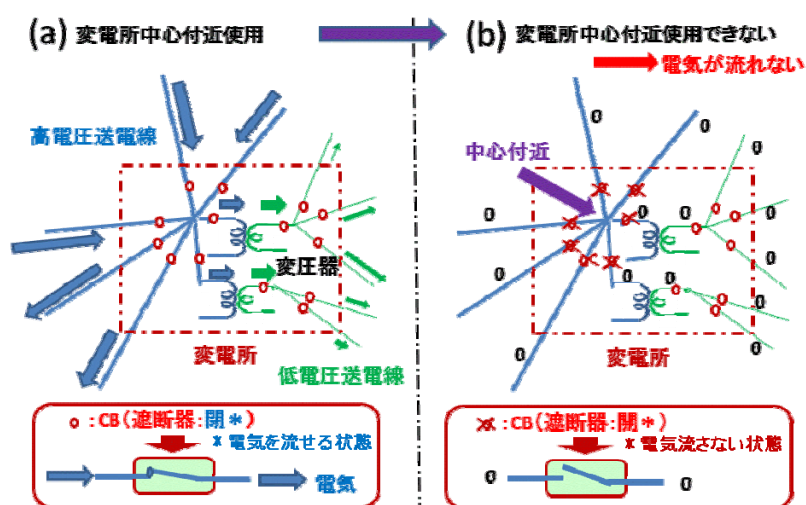


図 70 変電所を巡る電力の流れと母線の必要性

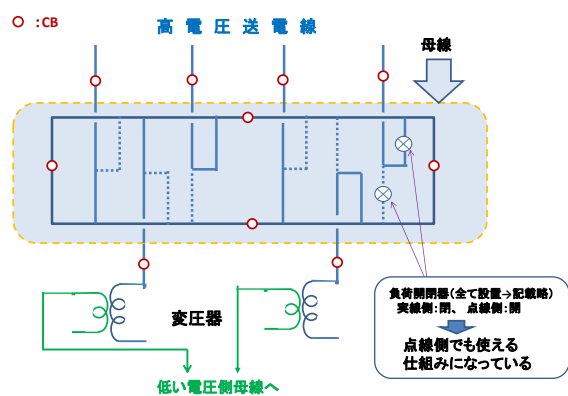


図 71 母線例：2 重主母線 4 バスタイ CB 方式

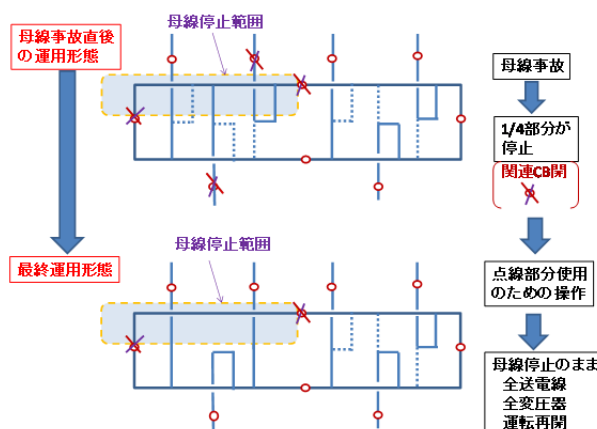


図 72 母線設置による全設備停止回避イメージ

さて、A,B,C3 変電所の高電圧側が 4 母線 4 バスタイ CB 方式とし（図-73-1）、変電所の運用変更機能を説明します。なお、CB 等の情報をいちいち図示すると目が疲れるので、割愛した「電力潮流図」も使われますのでご覧ください。（図-73-2）使いなれると全体状況が分かり易く把握できます。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

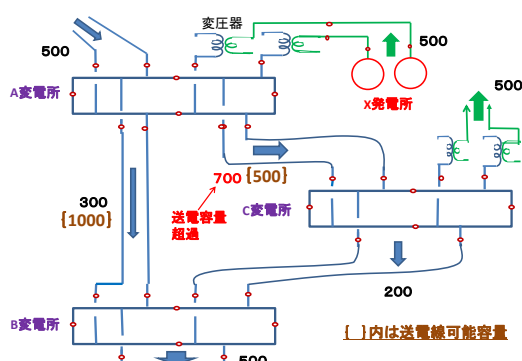


図 73-1. 3 変電所系統での母線を通した電力の流れ(例)

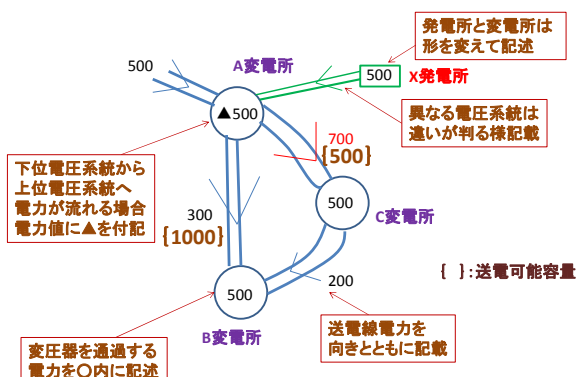


図 73-2 電力潮流図

図-73-1,2 の系統運用では A 変電所と C 変電所間の送電線の有効電力が送電可能容量を超過しているとする。ここで、CB を開き「超過」解消する方法を示します。図-74-1、74-2 では、送電線の CB を開放し解消されます。図-74-3 は A 変電所を変圧器に繋がる部分と変圧器のない部分に分け運用する方法です。図-74-4 は C 変電所をいわば 2 つの変電所に分けて運用する方法です。この場合、種々の制約条件があり、検討には相当な専門性が必要となります。

なお、これ以外の運用方法も有り得ますが（ここでは省略）、どれを採用するかは電力の流れの状況や電力系統全体の信頼性への影響等を総合的に検討し（相当量のコンピュータシミュレーションが必要）、日々や異常発生時の運用容易性等に関する系統運転者の意見も考慮し決められます。

ここでは、CB 操作で、電力系統の電力の流れ（潮流）を種々調整できることをご理解下さい。なお、母線運用による対応が長期的に効果ある場合、その運用形態での信頼性を維持や運用容易性を向上するため送電線や変圧器の母線への接続位置を変更することもあります。（引き出し口変更→興味深い分野ですが解説は省略）

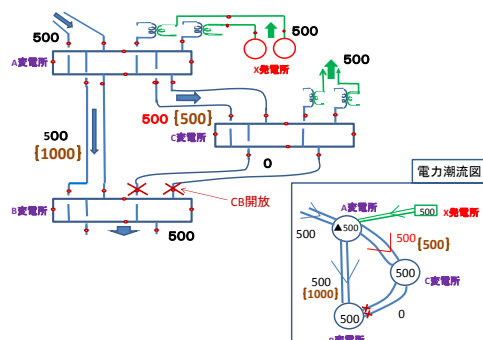


図 74-1 CB 開放による電力潮流調整 (例 1)

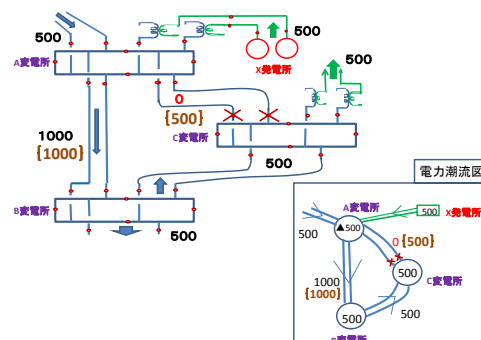


図 74-2 CB 開放による電力潮流調整 (例 2)

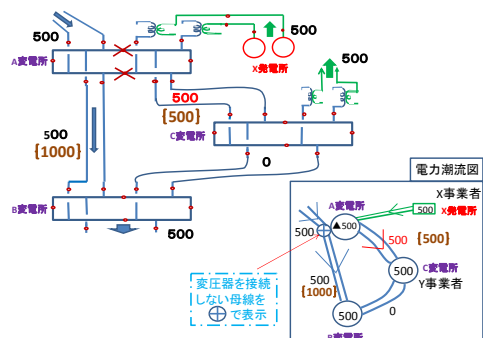


図 74-3 CB 開放による電力潮流調整 (例 3)

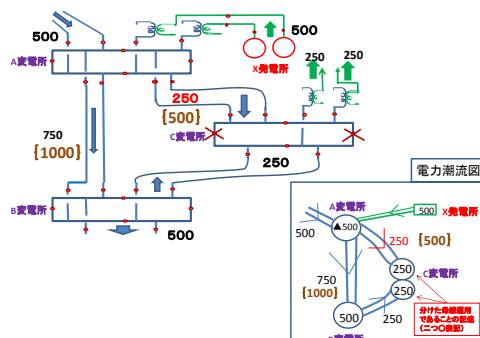


図 74-4 CB 開放による電力潮流調整 (例 4)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

(余談) 電力系統は技術的には「発送協力」

さて、図-74-3 の運用に際し「X 発電所は X 事業者、C 変電所の需要家はライバル関係にある Y 事業者と契約している」とします。(図-74-3 電力系統図) この系統運用では流通設備の容量超過解消のため、「X 事業者から Y 事業者へ A 変電所を通し電気を供給する」形態となっています。X 事業者は、安定運用のため、ライバルの Y 事業者 (の需要家) に対し「ひと肌」脱ぐ形です。

「発送一体」の定義は今ひとつ不明確ですが、「発電・送電が協力し合理的な電力系統運用を実現すること」を含むのなら、「電力自由化後」もここで示したような発送一体運用は必要と思います。発・送がそれぞれ自分の都合を優先し運用すると不合理が生じ、結局需要家のためにならないでしょう。

なお、協力するのに「資本関係の一体性が必要」(一企業として一体性)とは思いません。(一企業である方がやり易いのは事実ですが)

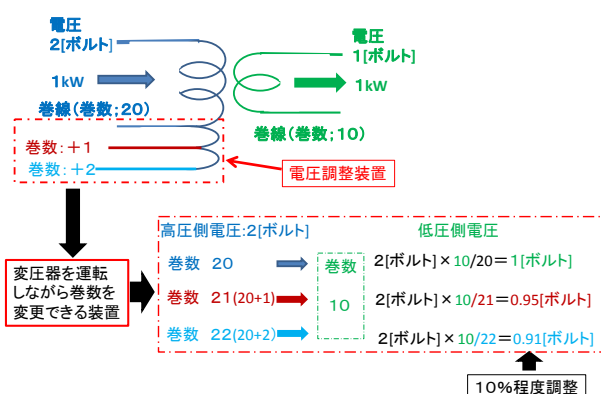


図 75 変圧器付設の電圧調整装置の基本イメージ

③電圧・無効電力電流の調整

次に電圧・無効電力調整を説明します。

なお、電圧調整は変圧器の電圧変換と比較すると、幅が相当小さいと考えて下さい。(数%程度)

電圧調整のため、通常、変電所変圧器には電圧調整装置が付設され巻き線比をある程度変更し電圧を調整します。(図-75) 一方、無効電力電流によっても電力系統電圧は変化するため(図-76)、変電所に無効電力発生設備(調相設備)(リアクトル又はコンデンサ(capacitor))を設置し、その開閉により電圧を調整します。なお、無効電力発生設備は、通常、変電所母線や変圧器3次回路(変電所内で使用する電力を取り出す低い電圧巻線)に接続されます。なお、無効電力発生設備のうちケーブル送電容量確保にも使われるリアクトル(第7回解説)や長距離架空送電線で無効電力発生が大きい場合、送電線と直接接続する形態で設置し無効電力を調整する場合があります。(図-77)

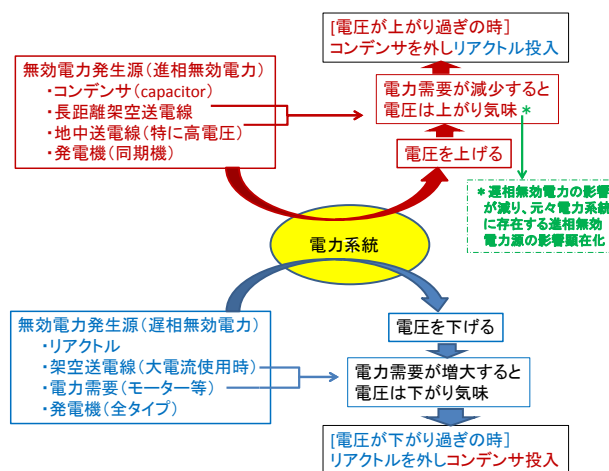


図 76 無効電力発生源と電力系統電圧の関係

電力系統電圧が高くなり過ぎると設備が壊れますし、低すぎると電力が送れなくなる(電力=電圧×電流→電圧下がると大きな電流が必要→設備に流せる電流限界値を超過)、また、送電ロス増加等の支障が出ます。特に、低くなり過ぎると電圧安定性と呼ばれる電力系統不安定現象を誘発する

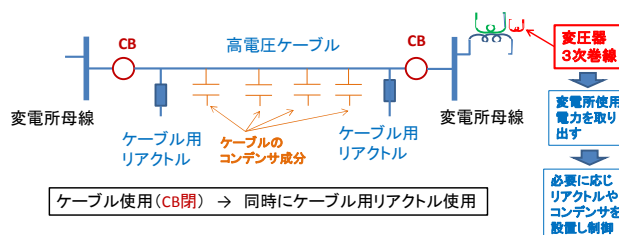


図 77 高電圧ケーブル発生無効電力補償用リアクトル設置例

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

危険があるため避ける注意があります。また、無効電力電流自体もケーブル容量や発電機運転制限（無効電流制限や運転電圧制限等）等に影響しますから必要に応じ制御が必要です。なお、無効電力電流は需要の大小の影響も大きい（図-76）、発電から需要を含めた総合的な検討が重要になります。

変電所での無効電力・電圧制御は、事前に設定された日時に対し特定のパターンで運転、加えて状況に応じ運転員が追加の対応をするのが一般的です。また、電圧運用や無効電力制御が複雑化する場合、電圧・電流等値に応じ自動制御運転される場合もあります。なお、発電設備も電圧調整し電力系統電圧と無効電力を調整できるため、変電所と合わせ「発・送一体」での総合的な制御が行われます。（電圧・無効電力調整分野も、「發送一体」です。）

ところで、発展途上国では（先進国でも時々みかけますが）、電圧・無効電力面への注意が不十分になりがちで実運用に障害が発生を生じている場合がありますので、適切なアドバイスが大切です。

④電力系統設備事故の除去

変電所には多くのブレーカー（CB）が設置され、設備事故が発生すると速やかに事故除去される様、高速（通常、0.1 秒以下）動作します。事故は電圧・電流の変化を事故判断システムで検出されどの CB を動作させるか高速に自動判断します。

変電所内設備と変電所につながる送電線事故に対し変電所 CB を動作させるのが基本ですが（主保護 図-78-1）、他変電所で事故が検出できない場合や動作すべき CB が不調（CB 事故など）な場合は応援する形で離れた事故に対して CB 動作する場合があります。

（リモート後備保護）（図-78-2）

（なお、拠点変電所では不調対応として変電所内で別対応する場合も有りますが（ローカル後備保護）、説明は略します）事故除去の際、余計な CB 動作で不要な電氣的ショックや停電地域拡大が起きないように（保護協調）、動作手順等を綿密に検討し判断条件等を設定します。ちなみに、図-78 の簡単な電力系統で CB 数は約 30、CB には開放・投入の 2 状態がありますから、この電力系統で想定される

CB 状況数は 2 の 30 乗＝約 10 億通りあります。この様な膨大なケースを念頭に検討する必要があります。そのため、技術素養と経験に基づく適切な判断が必要となります。

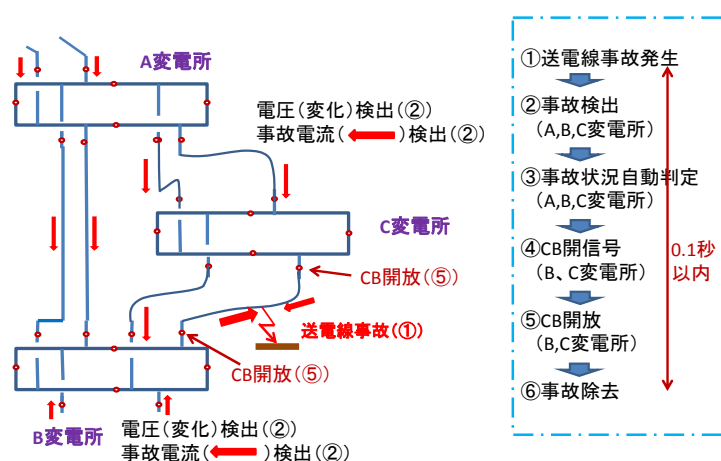
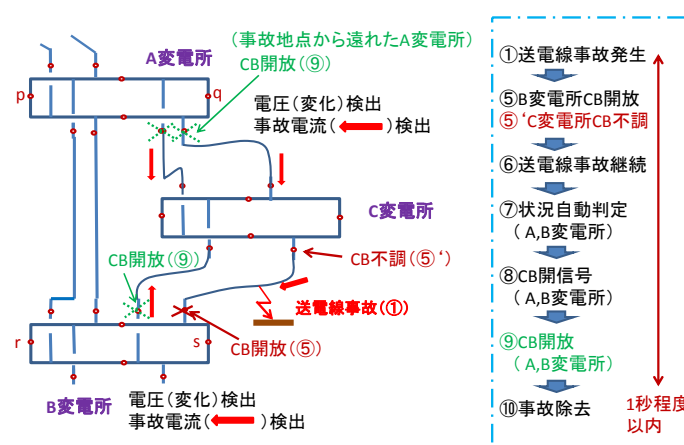


図 78-1 電力系統事故時の事故除去イメージ（主保護）



（実際は母線分離保護等が動作し更に複雑なCB(p,q,r,s等)開放が行われる）

図 78-2 電力系統事故時の事故除去イメージ（後備保護）

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

(余談) 電力系統技術は職人芸が生きる

ここで述べた②、③、④に関する技術は、それぞれの電力系統で一品料理的な面があり、検討の「プロ」になるのに 10 年以上を要し、かつその知識を標準化しづらい面があります。(刻々に検討条件は変わりますので)、この様な電力系統の日々の変化に対処する(ミスは停電(下手をすると大停電)に直結)経験を有した優良な人材確保は不可欠だと思います。3.11 以降、電力会社員の「高給」が問題視されましたが、個々の業務内容を見て職人芸育成には配慮をお願いできればと思います。

⑤電力系統状況把握用の計測

送電設備は高電圧で運転されるため計測設備は大型となります。このため、変電所にスペースを確保し計測設備を設置します。主要計測要素は電圧、電流で、瞬時値、平均値等を用途に応じそれぞれ計測します。また、電流は電力系統では小電流から大電流まで流れますが、精度よく測定するため大電流と小電流を分けて計測する場合もあります。なお、この他に、必要に応じ、周波数計測装置も設置されます。これらの計測装置は①で述べた変電所の運用変更がされても必要な系統データの計測漏れが生じないように配置されます。このため、相当数が設置(送電線、変圧器、母線毎)されることになります。電流計器は CT (Current Transformer) 電圧計器は VT (Voltage Transformer)、PD (Potential Divider) と呼ばれます。計測値は系統運用や、電力系統設備事故検出(④項参照)に使用されます。

⑥その他設備

①～⑤以外に、送電線有効電力調整設備(位相調整器)、直列コンデンサ(送電線リアクタンス補償設備)、系統安定化設備(電力貯蔵システム、制動抵抗など)が必要に応じ設置される場合があります。なお、③で述べた電圧・無効電力調整設備にサイリスタ等も併せて設置し、制御速度高速化や滑らかな出力制御をし、系統安定に役立てる場合もありますが(FACTS (Flexible AC Transmission Systems) 機器と呼ばれます)、別の回で解説します。

○変電設備の信頼度

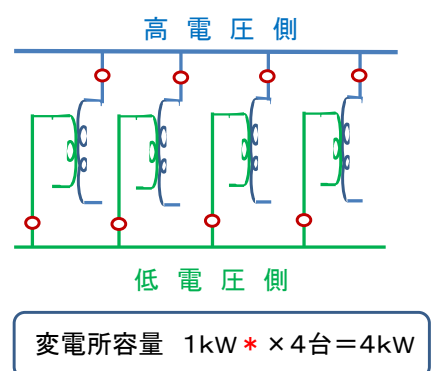
送電設備の信頼度について N-1 基準の考え方を紹介しました。(第 6 回)

全設備運転状況に対し、「1 設備を停止した場合、支障なく電力送電ができること」が基本的な考え方です。変電設備の場合も N-1 基準を適用されますが、設備構成や送電能力の特徴を考慮し検討されます。

変電所が変圧器容量 1kW・4 台で構成されている例で解説します。(図-79) なお、実検討では無効電力電流の影響も考慮しますが、ここでは有効電力のみで説明します。(専門的には、力率: 1 想定)

変圧器容量の電力を流した状況で、変圧器 1 台の突然停止を想定します。(N-1) (この場合、N=4) ここで、対象変圧器は過負荷(容量を上回る電流で運転)とその継続時間に図-80-1 の特性があるとしします。この変圧器は普段から油冷却しているため、ある程度の過負荷となっても油を含めた設備の温度上昇が比較的緩やかで短時間なら変圧器設備にダメージなく過負荷運転可能なためこの様な特性が得られます。

(なお、厳密には変圧器毎にこの特性は異なります。) 一方、変圧器の通過電力は、ロードカーブ(変



* 厳密には容量はkVA * で表示される
(* 無効電力電流分考慮)

図 79 変圧器 4 台の変電所

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

電所が供給する需要の需要曲線) に沿い変化するとします。(図-80-1)

朝 10 時に変圧器が 1 台事故停止を想定した場合、午後 6 時まで 8 時間、4kW、すなわち、定格容量の 1.25 倍の電力が通過します。一方、図-80-2 から 8 時間の場合、1.2 倍 ($3\text{kW} \times 1.2 = 3.6\text{kW}$) の過負荷が精一杯です。4kW は 3.6kW を超えていますから、「N-1 基準で問題あり」となります。

さて、更に電力系統の状況に踏み込んだ検討を説明します。事故を想定した変電所 (A 変電所) と B、C 変電所が低電圧側で送電線により連系しているとします。(図-80-3) さて、A 変電所で変圧器 1 台が停止した後、2 時間内に、A 変電所から供給している需要 (0.4kW) を B、C 変電所から送電する系統操作 (系統切り替え) できると、A 変電所の変圧器通過電力は 3.6kW (変圧器容量の 120%) となり 8 時間供給可能となります。この場合、N-1 基準上問題ないとなります。なお、A 変電所と C 変電所間の系統操作は異電圧ループ切り替えと呼ばれ、慎重な検討が必要です(図-80-4)。異電圧ループ切り替え可能な場合、変圧器停止後、停電なく電力供給を継続でき N-1 基準上問題なしと判断されます。

なお、系統条件でループ切り替えできなくても、図-80-4 の場合で言えば、一旦、A、C 両変電所の X 送電線用 CB を開放し、X 送電線の需要家を停電させての切り替えをすることは可能です。これは「停電切り替え」と呼ばれる切り替え方法ですが、切り替え中 X 送電線から供給される需要は停電します。(通常は短時間) このため、停電切り替えについては N-1 基準を満たさないとする場合と、満たすとする場合があります。読者の皆様はどう判断するでしょうか？

(余談) 変電所の N-1 基準は奥が深いので――

N-1 基準は、特に変電所の場合、細かい定義が可能です、柔軟な系統運用・系統設備形成が可能になりますが、一方、細かく定義する程、電力系統運転者は想定される対応を適切に行わなければなりませんから、ある意味、負担が生じます。実際の運転条件では系統操作が時間内に行えないこともあり得ますから、「絵に書いた餅」とならない様実態を踏まえる必要があります。

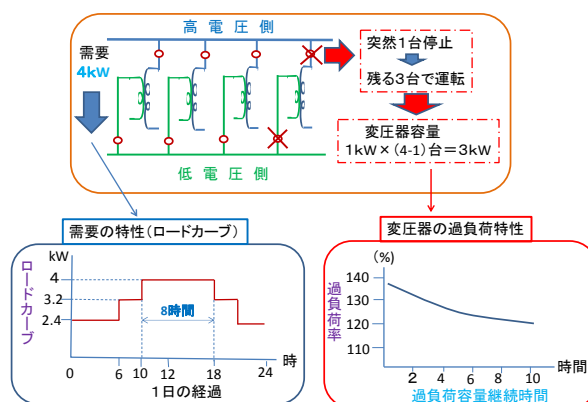


図 80-1 変電所での N-1 基準検討イメージ(検討要素確認)

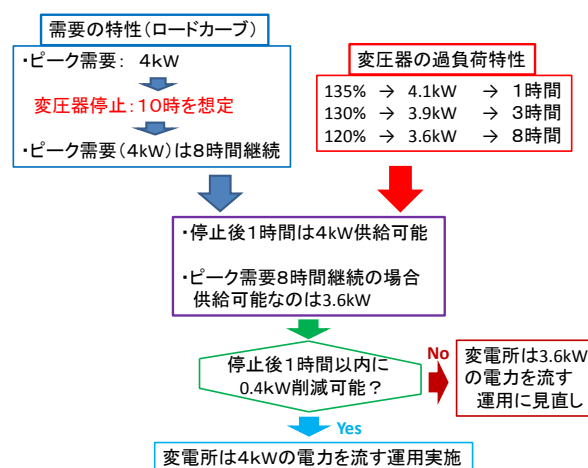


図 80-2 変電所での N-1 基準検討イメージ(検討ステップ)

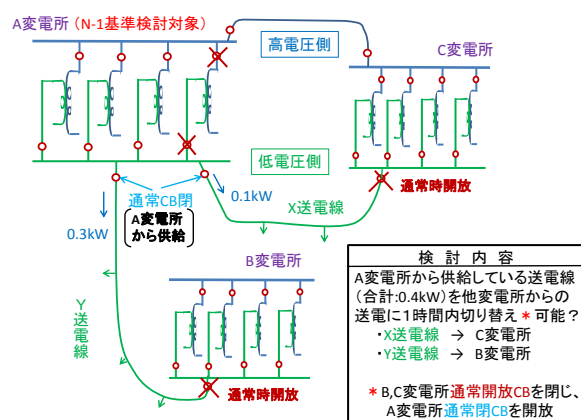


図 80-3 変電所での N-1 基準検討イメージ(通過電力削減)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

発展途上国の技術者と議論すると、「このような系統操作を N-1 基準に織り込むのは不可能」と主張される場合もあります。この場合、系統信頼度をチェックする部門と流通設備運用部門が協働して検討する体制となっていない場合があります。一方、運用部門の現場の対応能力が一定レベルに達していない場合もあります。このため、実態をよく確認し協議する必要があります。

変電設備関連の信頼度チェックは奥が深く、他にも種々考慮すべき事項がありますが、「わかりやすい」の趣旨を超えるためこの程度に止めます。

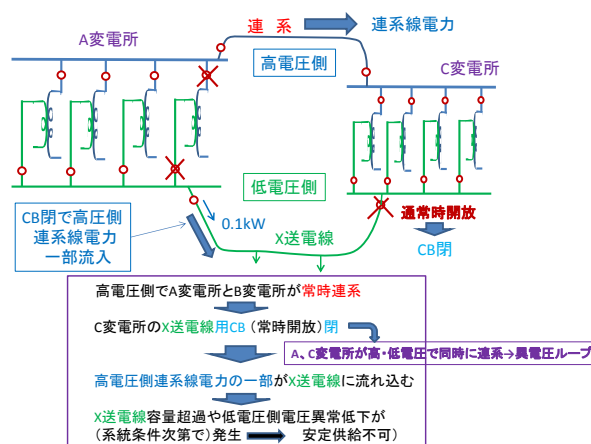


図 80-4 補足：異電圧ループ切り替えの説明

ところで、前記の N-1 基準の解説で、変圧器通過電力を減らす方法を示しましたが、今後、スマートメータの導入・活用が進むと「需要制御（デマンドコントロール）」で通過電力を減らす（→通過電流を減らす）ことが適用可能なオプションになるかも知れません。

一方、再生可能エネルギー導入が進むと、そもそも通過電力が一定しないので「N-1 基準の考え方は有効か？」との議論が出てくるかも知れません。

ところで、例えば、直流変換器は変圧器の様な過負荷運転はできない等、変圧器とは異なる過負荷特性の設備も種々あるので注意が必要です。

○変電所トータルの信頼性評価と設備規模の標準化

変電所を構成する変圧器等個々の設備信頼度チェックで問題ない場合も、変電所自体が全停止した場合の影響度チェックも併せて必要です。これにより変電所 1 箇所集中の「弊害」を避けるため 2 箇所に分割する場合もあります。2 箇所にすると通常投資額は増しますが、例えばステップバイステップの拡充等を考えると現在価値換算額は返って小さくなる場合もあります。2 箇所化が信頼度的に望ましい場合、現在価値や総投資額をいかに小さくし 1 箇所集中と同等なし以下とするかが電力技術者の「腕のみせどころ」です。図-81 に 1 箇所集中配置と 2 箇所化のイメージを示したので、微妙な「工夫」を比較下さい。

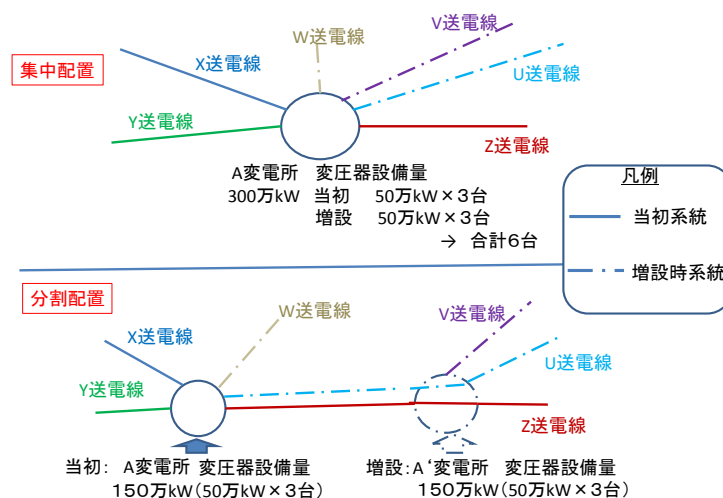


図 81 変電所の集中配置と分割配置の比較イメージ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

なお、この様な比較を一々せず、「変電所の規模（変圧器の容量と設置台数等）を標準化し、その規模を上回る設備が必要な場合は、新しい変電所を設置する」として対応（ルール化）する場合があります。なお、この様な場合、ルール設定時以降に前提条件が変化し、見直す必要がある場合も出てきますから、適宜ルールの妥当性をチェックすることが望ましいと思います。

変電所の解説はこの程度とし、次回は配電系統を解説します。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

読者の広場

Q&A

Q : 「最近、欧米のメーカーの MgB_2 線材の話を書きますが、2001 年に秋光先生が発見された¹⁾後、 どうなっていますか？」

A : つい先ごろも、あのヒッグス粒子で有名な欧州の CERN が 20 kA の世界最大容量の超電導ケーブルを MgB_2 で作ったとの報道 (小誌 6 月号参照 2²⁾) がありました。これは、イタリアの Columbus という会社の線材を使ったものですが、米国でも HyperTech という会社が作製しています。日本では、物材機構が基本的な線材の特性改善を行っています。量産化しているメーカーは聞きません。

MgB_2 は臨界温度が 39 K と YBCO の 90 K 級、BSCCO の 120 K 級に比べると低いのですが、マグネットに使いやすい丸線が容易なこと、量産が数百 km すでに可能であり、多量発注にも応じやすいこと、それになんと言っても値段が安いことが特徴です。

機器応用が進むにつれ、将来の事業化を考えると、値段が大きな要素に なってきます。BSCCO は相当な機器が作られてきていますが、Ag が相当量使われること、YBCO の機器応用はこれからが本番ですが、作製コストのさらなる低減に加え、極薄のテープ形状でマグネットをどう手間がかからずに作製していくかが近々の課題です。

MgB_2 は粉末を金属パイプに詰めて、金太郎飴みたいに金属加工で丸く伸ばしていただくので、原材料の安さと同時に加工代も安く済みます。また、マグネット設計、作製も従来の NbTi と同じ丸形状ですので、楽です。このため、欧州では MgB_2 を使った風力応用などの検討も進んでいます。

ただ、大きな欠点は、さきほどの臨界温度が低い、また、それにより使える磁場が筆者の見るところ 20 K (液体水素は使えます) で高々 3-5 T 程度ですので、応用次第、あるいは機器設計次第で各線材の活躍する分野のすみわけが、今後出てくるのではないかと思います。

参考 :

- 1) http://www.phys.aoyama.ac.jp/~w3-jun/achievements/study_sc_history.html
- 2) WEB21-2014 年 6 月号 世界の動き http://www.istec.or.jp/web21/pdf/14_06/all.pdf

回答者 : (公財) 国際超電導産業技術研究センター 超電導工学研究所 特別研究員 山田 穰

[超電導 Web2.1 トップページ](#)