SCDC+SC motor & Generator for Pumped Hydro - Storage System for Stable Electric Supply

超伝導直流送電（SCDC）& 超伝導モータ・発電機を用いた揚水発電 ― 新しい電力貯蔵システムと電力安定供給

山口作太郎
yamax@fsc.chubu.ac.jp
中部大学・フェロー／名誉教授

1

Today's Talk

はじめに
電力のエネルギー・シェア予測
日本の現在の電力供給
電化を進めるための現在の課題
IAE/BP World Energy Outlook を参照にして

1. 超伝導直流送電 (SCDC)
何故、 直流か？
何故、 超伝導か？　課題は何か？
石狩プロジェクトとSCDCの進展
SCDCは現在どこまで来ているか？

2. 再生可能ネルギー(RE)
日本の色々な電源の電力シェアと課題
電力貯蔵システム
IAE/BP World Energy Outlook を参照にして

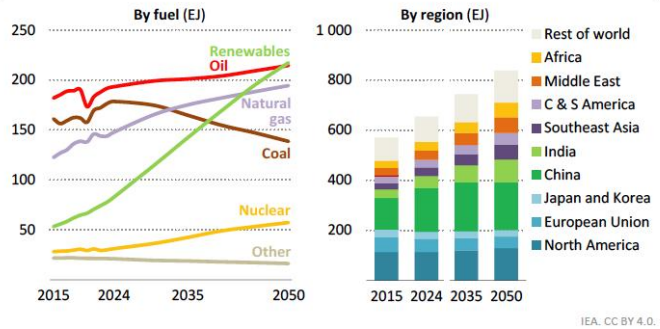
3. 超伝導揚水発電所と電力貯蔵
世界の揚水発電所と二次電池貯蔵
揚水発電所の特徴と課題
提案：超伝導発電機／モータ＋SCDC
超伝導発電機／モータの設計検討
日本での超伝導揚水発電所の可能性

4. 将来の電力システム
全電力システムの未来像
地球規模の送電線システム
これからの1000年（ミレニアム）
まとめ

2

電力のエネルギー・シェア予測

Figure 3.1 ▷ Total energy demand by fuel and region in the CPS to 2050



Around 90% of global energy demand growth comes from emerging market and developing economies, and global oil and natural gas use rises through to 2050

Notes: EJ = exajoule; C & S = Central and South America. Other includes traditional use of biomass and non-renewable waste.

IEA World Energy Outlook 2025, Fig. 3.1, p. 122

2050までの予測

a) Coalは減少
b) Renewable, Nuclearはシェアが倍増し
c) 天然ガスは半分以上は電力に転換して利用
d) Oilは自動車や航空機などや化学材料として利用
e) その他は少ない

↓

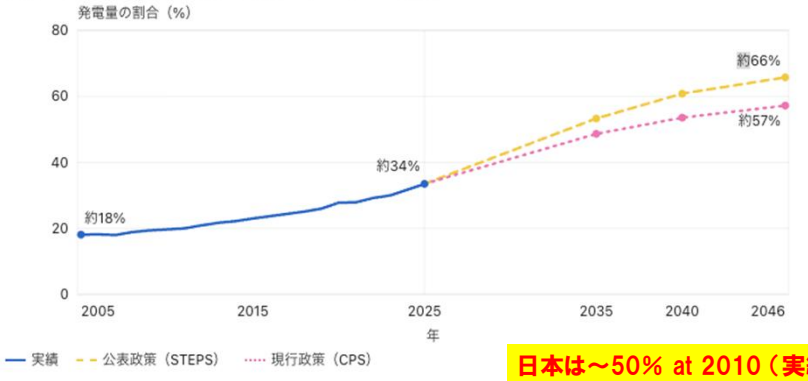
電力シェアの増大
再生可能エネルギーの急速な増大

3

電力のエネルギー・シェア予測

電力シェアの著しい増加

世界の発電量に占める再生可能エネルギーの割合



IEA World Energy Outlook 2025, Table A.3, p. 417
からグラフ化

日本は～50% at 2010（実績）
2075年にはシェアは75%超え予測

今世紀中には更に高くなるであろう

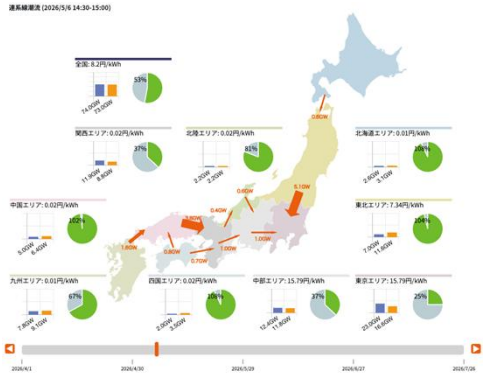
4

現在の日本の電力供給

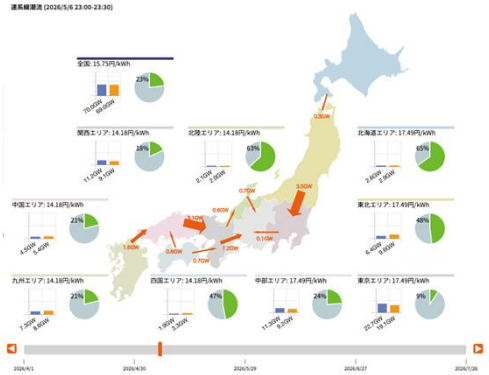
電力会社間の電力バランス

https://www.renewable-ei.org/statistics/electricity/#regional

2026/05/06 14:00-14:30



2026/05/06 23:00-23:30



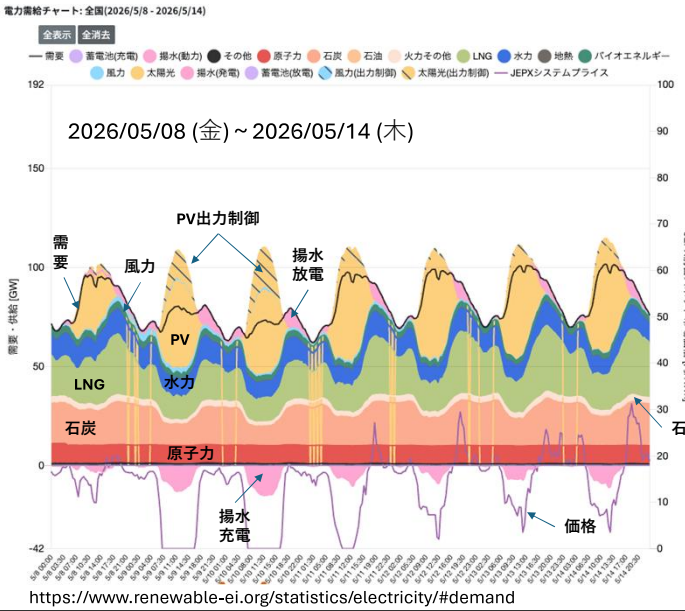
1) 電力バランスは同じ日でも時間によって異なる
2) 電力の流れは、東電、中電、関電に他の電量会社から流れ込む
3) 太陽電池が発電する晴天日中は著しく電力価格が安価
4) 他国に比べて、電力会社間電力網は弱く、送電線の投資は必要
5) 連休明けの5月7日も電力需給は大きく変わらない

電力の40%が卸電力市場を通じて売買

卸電力取引所のデータを自然エネルギー財団がまとめた結果

5

現在の日本の電力供給



https://www.renewable-ei.org/statistics/electricity/#demand

1) 原子力の出力はほぼ一定
2) 石炭火力は需給に合わせて出力変化
3) LNG発電は需給を合わせて大きく変化
4) 水力はほぼ一定
5) 風力・地熱・バイオマスは小さいシェア
6) 昼間はPV発電が大きく、揚水発電に充電
7) PV発電が更に大きい場合には出力を制限（電力は全国規模で余っている時がある）
8) 主な充電は揚水発電であり、二次電池規模は小さい
9) 揚水からは主に朝夕に放電（容量の半分以下の利用）
10) 価格はPV出力制御時にはほぼゼロ円であり、朝夕に価格高騰が生じる

揚水発電 &二次電池導入は今後進む技術・経済的基盤が強固（詳細は後述）

6

電化を進めるための現在の課題

再生可能エネルギー（PV, 風力）は本来安価であり、将来の主たる電源である
しかし、現在は出力制御を行い、日本では電力価格が2011年意向増加中

↓

対策を下記の表にまとめる

	対策	向いている用途・条件	評価
1	**給湯・EV充電などを昼へ移す**	使用時刻を変えられる需要がある	既存設備を使える場合、追加投資を小さくできる
2	**既存揚水の活用・運用改善**	揚水能力・貯水池・送電網に余裕がある	大量の余剰電力を吸収する有力手段
3	**蓄電池の導入**	昼の余剰を夕方・夜へ移したい	設置場所を選びやすいが、費用と劣化を含めた採算確認が必要
4	**送電網の増強**	他地域には需要があるが、送れない	地域間の偏りには有効。広域で同時に余る時間には効果が限られる
5	**揚水発電所の新増設**	大容量の貯蔵を長期間、繰り返し使える	長期対策として有力だが、立地・建設費・工期の検討が必要

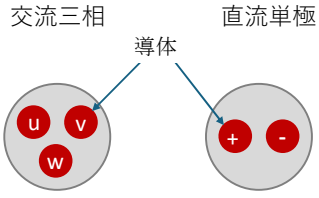
資源エネルギー庁HP等からの引用

本講演では、超伝導機器を利用した送電線と揚水発電所の増強＋増設について提案し、これからの世界を予測する

7

超伝導直流送電（SCDC）何故、直流か？

銅・アルミ導体での電力輸送

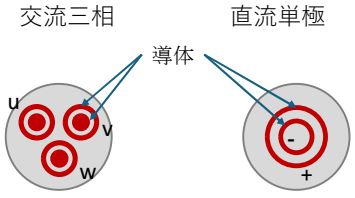


構造
1） 直流では絶縁された2導体
2） 交流では絶縁された3導体

↓

長距離・大電力送電では少ない導体で多くの電力が運べるため直流利用が多い
（1.73倍～3.5倍の差）
更に、無効電力が発生しないため、水中ケーブルは直流利用

超伝導ケーブルでの電力輸送



構造
1） 導体外に磁場を発生しないために導体は同軸状に配置が必要
2） 直流では絶縁された2導体
3） 交流では絶縁された6導体（多くの実験例）

注1）導体は液体窒素温度で冷却が必要
注2）断熱性能と冷却が経済性を下げる
注3）交流での発熱が経済性を下げる

8

超伝導直流送電 (SCDC) 何故、直流か？

	交流_銅・アルミケーブル		直流_銅・アルミケーブル	
	三相	単相	単極	双極
導体数	3	2	2	2 or 3
送電電力	$\frac{\sqrt{3}\,I_m \times V_m}{2}\cos\varphi$	$\frac{I_m \times V_m}{2}\cos\varphi$	$I_m \times V_m$	$2\,I_m \times V_m$
送電電力／導体数	$\sqrt{3}/_6 \cos\varphi$	$1/_4 \cos\varphi$	$1/_2$	$1 \sim 2/_3$
	超伝導・交流		超伝導・直流(SCDC)	
	三相	単相	単極	双曲
導体数	3 or 6	2	2	2, 3 or others
送電電力／導体数	$\sqrt{3}/_6 \cos\varphi \sim \sqrt{3}/_{12} \cos\varphi$	$1/_4 \cos\varphi$	$1/_2$	$1 \sim 2/_3$

今までに世界的に広く行われた**超伝導交流ケーブル**では、**超伝導直流ケーブル**の
~10倍の導体が同じ電力輸送に必要

↓

超伝導**交流**ケーブルは、**高価 & 技術的難易度が高い**
半導体技術の急速な向上によって直流・交流の変換が容易になると同時に銅価格の上昇によって銅・アルミケーブルでも直流利用が急速に普及（特に、iDC）

9

超伝導直流送電 (SCDC)
何故、直流超伝導か？　課題は何か？

特徴と選択理由

1) 直流では超伝導で抵抗がゼロ　（**交流では抵抗が発生し、低減技術に高度で高価**）
2) 超伝導では、交流と直流の差が大きく断熱二重管を含んだコストは交流が~10倍高価
3) 直流では電流密度が銅・アルミ比べて100倍以上高い（小型化が可能）
4) 抵抗が低いため、送電電圧を低く出来る（超高電圧利用は無意味）
5) 直流利用のための電力変換器が必要
6) 直流電流遮断特性は交流とは大幅に異なり、超高圧での電流遮断は困難
7) 長距離に渡る低温・冷却が必要（細長いクライオスタットが必要）
8) 稼働率の高いケーブルでの利用が不可欠

↓

課題と設計＋＋

1) 細長いクライオスタットが十分な断熱性能を持つか？（**マグネットと大きく性格が異なる**）
2) 細長いクライオスタットでの**液体窒素**（低温冷媒）が長距離にわたり、低温流体を流すことが可能か？
3) 高い稼働率の応用先（クライオスタットの高断熱との関連）
4) COPの高い冷凍機はあるか？
5) 大電流ケーブルがテープ線材を利用して可能か？
6) 高圧の電力変換器及び直流電流遮断器は十分に安価か？

10

超伝導直流送電（SCDC）での長距離冷却

石狩プロジェクト以前でのスケール則による見積り

冷媒の出口温度で超伝導の性能が決まる

Distance :	1 km	→	10 km
ΔT:	2.0 K	→	2.0 K
Flow rate:	30 L/mim	→	300 L/min (these depend on the experimental data)
Pressure :	0.1MPa	→	$100/2^5$ = 3.125 MPa
Pump work:	50 W	→	50×10×3.125=1562.5 W
Heat load:	0.05W/m	→	0.156 W/m

↓

もし、管径を太くして流体損を下げると、熱侵入量が増える
このスケール則では10 kmの送電線すらできない

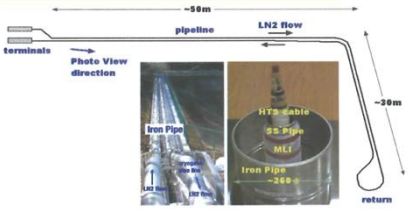
↓

従来の断熱二重管の基本構造の抜本的な見直しが必要

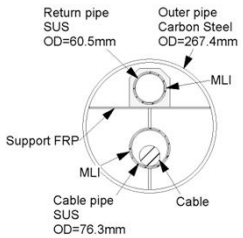
11

超伝導直流送電（SCDC）
石狩プロジェクトでのSCDCの進展

中部大200m他（外管1本、内管1本）

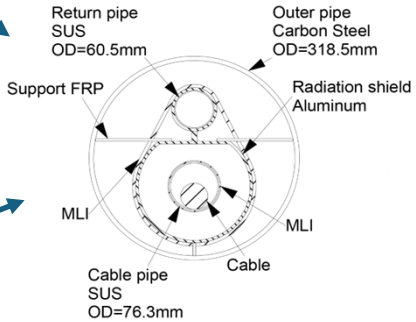


S. Yamaguchi et al, "Iron-steel cryogenic pipe for DC superconducting power transmission line", *IEEE Trans. Applies Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1046-1049 (2011).



輻射シールドの利用

石狩プロジェクト回線２



Yamaguchi S, Kozhizuka H, Hayashi K and Sawamura T 2015 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25** 5402504

石狩プロジェクト回線２（外管1本、内管2本）

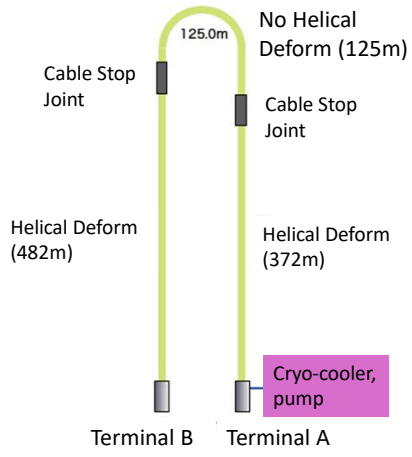
12

石狩プロジェクト

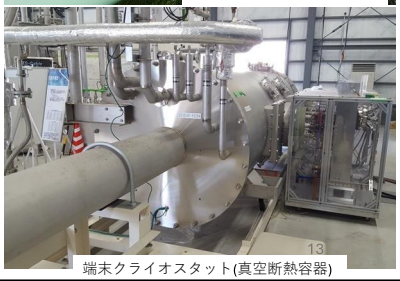
○2013年から、経産省の委託事業で、世界最長(1㎞)のSCDS実証実験施設を石狩市に建設

○委託先は、中部大学・千代田化工・住友電工・さくらインターネットからなる技術研究組合

○委託額：41億円(2011年度：25億円、2012年度：15億円、2015年度：1億円)



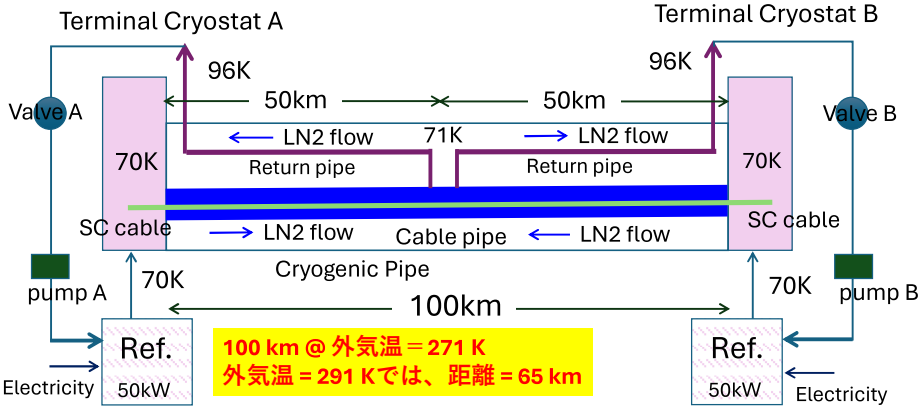

石狩実験施設内のSCDC配管


端末クライオスタット(真空断熱容器)

13

超伝導直流送電（SCDC）
SCDCは現在どこまで来ているか？

石狩プロジェクトの実験データをスケール則を適用した熱・流体設計



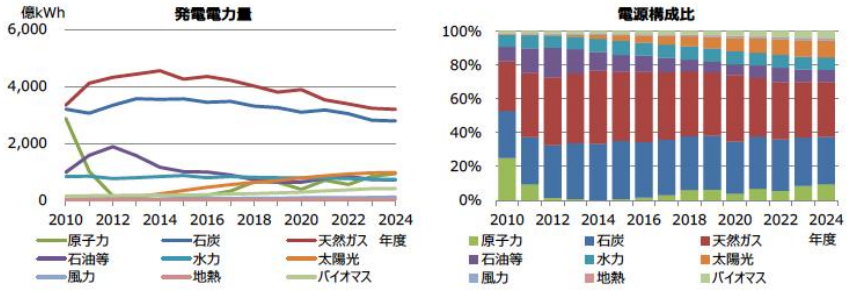
その後、断熱二重管の研究によって、MLIによる断熱性能が～3倍向上
建設コストの企業を含んだ検討で次のSCDCでは、～20億円／km
（2010年の地下埋設、高圧銅ケーブルの建設コスト～10億円／km）
その後、銅価格の高騰によって、現在は銅ケーブルとほぼ同程度か！

S. Yamaguchi et al, *Journal of Physics: Conf. Series* **1293** 012967, (2019)

14

再生可能ネルギー（RE）
日本の色々な電源の電力シェアと課題

<図表35：電源構成の推移>



資源エネルギー庁・総務課戦略企画室「令和6年度(2024年度)におけるエネルギー需給実績(確報)」令和8年4月

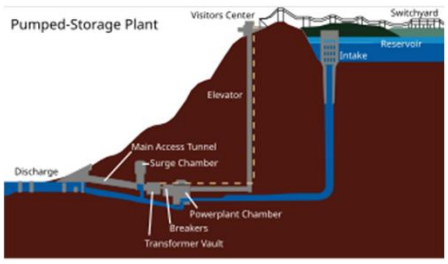
2024年度では、太陽光(PV)と水力が主たるRE電源であるが、シェアは10％以下
しかし、既にPV出力制御が安定供給のために必要

↓

これ以上のPV導入には送電線と電力貯蔵設備の大幅な拡大が必要
尚、PV導入のための土地は国内に十分に存在し、自然破壊は避けることが原理的に可能

15

再生可能ネルギー（RE）
電力貯蔵システム　主たる2つのシステム：揚水発電所と二次電池



A diagram of the TVA pumped storage facility at Raccoon Mountain Pumped-Storage Plant in Tennessee, USA

発電機／モータ＋水車で上池＆下池で水の循環を行う
効率70%～80%
元々原子力発電用に揚水発電所が建設
特徴：容量が大きい、　寿命が長い
土木工事が大きい

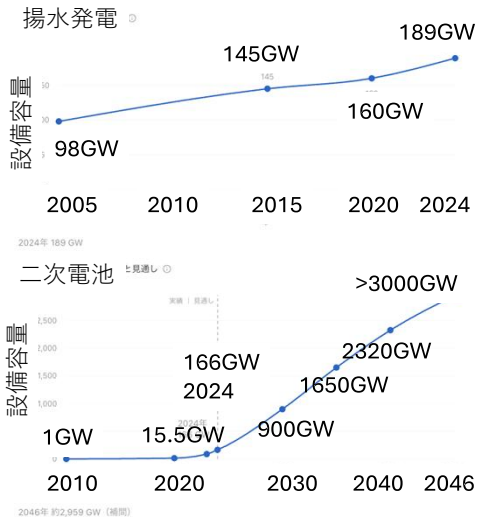


https://www.energytech.com/battery-innovations/article/55413255/chemistry-built-for-the-pulse-how-ai-and-batteries-are-redefining-the-ups?utm_source=ET+Transition&utm_medium=email&utm_campaign=CPS261015089&o_eid=4797J7980023I4A&rdx.ident[pull]=omeda|4797J7980023I4A&oly_enc_id=4797J7980023I4A

ビル内設置の二次電池による電力貯蔵
効率:80%～95%
特徴：短い時間で設置可能、寿命は短い
需要地の近くに設置

16

超伝導揚水発電所と電力貯蔵
世界の揚水発電所と二次電池貯蔵



2020年頃までは、揚水発電が唯一の電力貯蔵設備
2025年頃には同じ発電容量

揚水発電所は場所が限られるため、ゆるやかな増大
二次電池電力貯蔵は2025年以降卸電力市場の普及により急激に増大

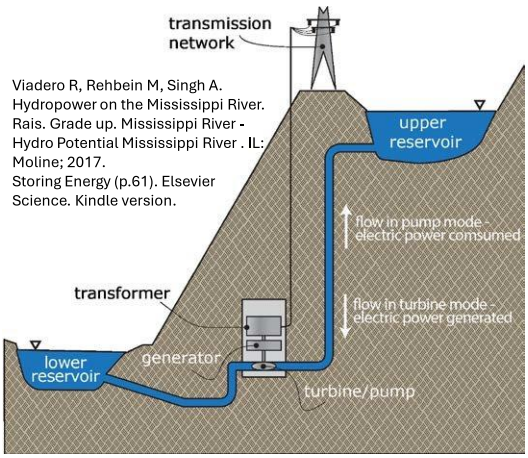
二次電池寿命 ≲ 20 years
揚水発電寿命 ≳ 100 years

↓

超伝導技術で電力貯蔵に貢献できないか？

17

揚水発電所の特徴と課題



Viadero R, Rehbein M, Singh A. Hydropower on the Mississippi River. Rais. Grade up. Mississippi River - Hydro Potential Mississippi River . IL: Moline; 2017.
Storing Energy (p.61). Elsevier Science. Kindle version.

上池、下池の標高差をとるため、山岳地区に建設されることが多い
発電施設が山中か地下に設置される
ダムを伴うことが多い

a) 適地を見つけることが重要

b) 発電所のトランス、発電機、水車などの大型重量機器を多くの場合、地下に設置

c) それらの重量機器を山中まで運ぶために強度の高い幅広道路が必要

↓

1) **大規模土木工事費が必要**
2) **メインテナンス費用も大きい**
3) **大きな自然破壊**

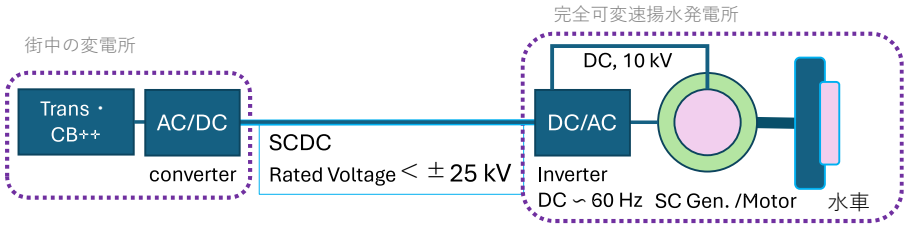
↓

A. **超伝導発電機は小型**
B. **SCDCは高圧にする必要が無い**
C. **最も重い高圧トランスが大幅に小型化**

18

超伝導発電機／モータとSCDCとの組合せ

提案模式図：SCDC + Superconducting Gen. + Motor



基本仕様

a) 最新鋭の完全可変速揚水発電システム
b) 超伝導直流送線（SCDC）を導入し、街中の変電所まで伸ばす

↓

発電機／モータの仕様

1. 極数は 12 or 24.
2. 周波数は 50 Hz or 60 Hz.
3. ロータ絶縁電圧は10 kV ~ 20 kV.
4. 出力は 30 to 400 MVA
5. 完全可変速の発電機／モータ

発電機／モータは1/4 -1/10の重量
高圧トランスが不要
高圧大電流遮断機も不要

↓

揚水発電所の総合コストが低下し、長寿命、 低コスト電力貯蔵設備

↓

揚水発電所の幅広い導入可能性向上

19

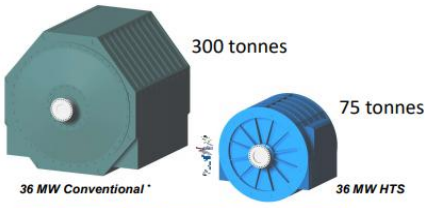
a1

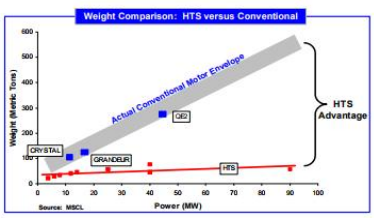
超伝導発電機／モータの設計検討 – 1

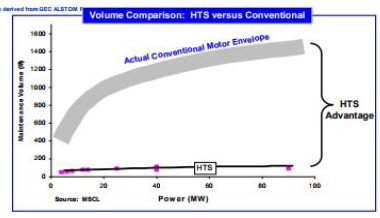
Collaboration with Research Prof. Kim Chang Hyun and Prof. Minwon Park, at the Changwon National University, Korea

超伝導可変速発電機/モータと従来の発電機の比較

- Inherently quieter
- Higher net efficiency
- Lower operating cost
- Smaller volume
- Lighter







- According to the presentation of the AMSC, the conventional rotating machine has 300 tons at 36 MW (rotating speed 120 rpm)

CAPTA
Center for Advanced Power Technology Applications

20

20

スライド 20

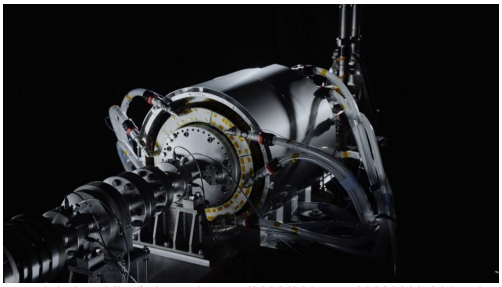
a1 New page
askim0124@gmail.com, 2023-05-17T08:02:07.896

K1 0 From AMSC presentation
KimChanghyun, 2023-05-22T05:08:50.671

超伝導発電機／モータの設計検討 – 2

日本での東芝の検討例

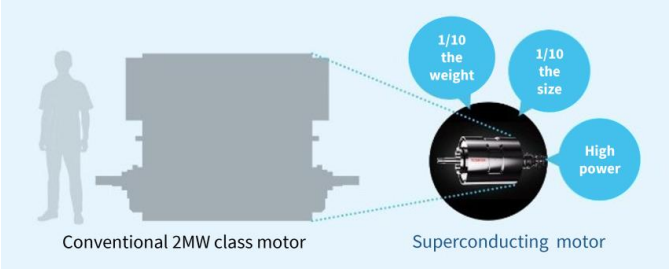
1. Compact, less than 1/10 the weight of conventional motors, but with the same output.
2. Seeing technology in terms of social issues. Why Toshiba developed a superconducting motor.
3. A culture of "Everyone is equal in the face of technology" and pursuing a shared goal.



https://www.global.toshiba/jp/news/energy/2022/06/news-20220623-01.html

～1/10

現在は航空機向けモータの開発を継続中のため、更なる重量の低下か？！



21

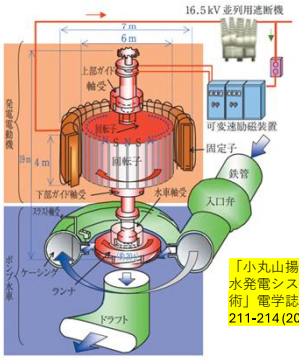
日本での超伝導揚水発電所の導入可能性

5.2.4 既存ダムの有効活用

既存のダムは 2,700 ヶ所余り[9] あるが，水力発電所が併設されているダムは 700 ヶ所余り，更に揚水発電所はそのうち 42 ヶ所と極端に少ない。新たな揚水発電所をダムから建設することは現実的ではないが，ヨーロッパでは既設の発電所やダムを活用して揚水発電所を建設することも進められており[10]，太陽光発電や風力発電の多い地域の既存の発電所やダムを活用して，中～小容量の揚水発電システムを設置することにより，大掛かりな工事を極力減らして，電力系統の柔軟性，弾力性は向上させることも期待できる。

9） 一般財団法人日本ダム協会，ダム便覧2019, http://damnet.or.jp/cgi-bin/binranA/Syuukei.cgi?sy=sou
10） HYDRO REVIEW, Voith to provide equipment for new Ritom pumped storage powerhouse, https://www.hydroreview.com/world-regions/voith-to-provide-equipment-for-new-ritompumped-storage-powerhouse/

森淳二 「揚水発電システムによるエネルギー貯蔵技術の現状とこれからの展望」日本エネルギー学会誌　えねるみくす, Vol. 100, No.2, pp. 135-144 (2021).



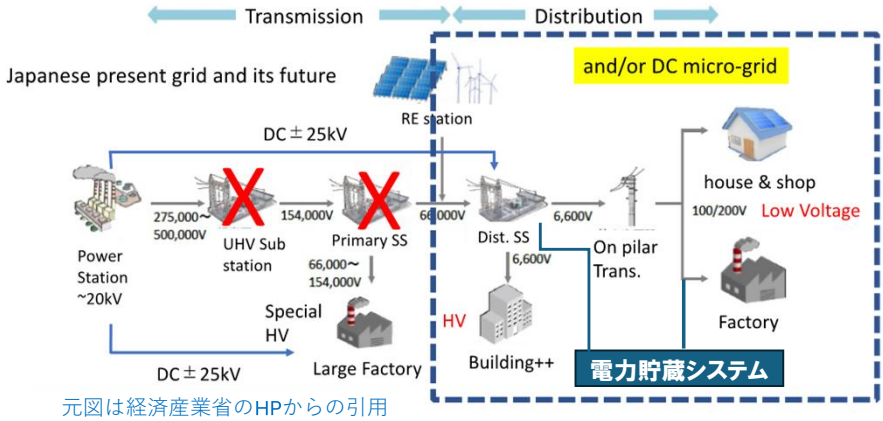
「小丸山揚水発電所　可変速揚水発電システムと最新の工事技術」電学誌, Vol. 128, No.4, pp. 211-214 (2008).

図３　可変速揚水発電システム概要

1. 導入費用が安価であれば、国内に多くの導入場所が存在か！
2. 二次電池との棲み分けは導入場所が異なるため、可能
3. 今までに多くの開発費を投入した超伝導発電機・モータの技術が生きる
4. 軽量小型化による導入期間が短縮

22

将来の電力システム　電力システムの未来像



元図は経済産業省のHPからの引用

送電線網からUHV & HV 変電所をなくす

↓

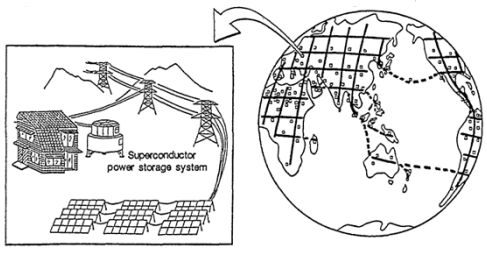
発電機の交流電力を直流化し、電圧≦50 kV（日本の規格では配電変電所のみ）

直流利用の最大化
RE+Electric Storageの最大化
銅資源はend user（末端利用@家庭、工場、オフィス、電気自動車など）での電気化で利用

23

将来の電力システム地球規模の電力システム

地球規模の送電線は電力貯蔵機能を果たす
最初の提案は三洋電機・桑野幸典先生
提案：PV+高温超伝導直流送電

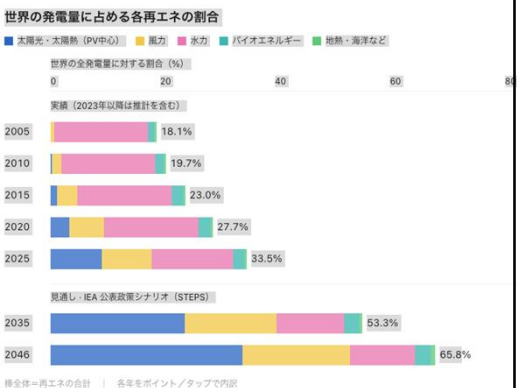


Y. Kuwano, *Proc. 4th Int. Conf. on Photovol. Science and Engineering,* Sydney p. 557, 1989.

地球規模の送電線と砂漠へのPVパネル導入
SCDC送電線で消費地につなぐ
地球を東西につなぐ国際送電線網を構築
桑野以降、北澤、鯉沼ほか多くの研究者が提案

実際、現在砂漠でのPVからの電力コスト
~2 cent/kWh（一番安価）

今世紀後半以降は、PVが主たる電源と多くの国で予測



IEA World Energy Outlook 2025, Table A.3b, p. 423 一部変更

24

将来の電力システム
これからの1000年（ミレニアム）

人類の進歩は一人当たりのエネルギー消費量（特に、電力消費）に依存
最近ではAIデータセンターによる急激な電力消費増大
太陽電池は間違いなく主要な電源になる
同時に電力貯蔵と地球規模の送電線が必要
地球規模の送電線はSCDC
（現在はUHVDCで< 3000 kmまで）

↓

建設費は巨額になるため、長寿命が必要
lifetime > 100 years

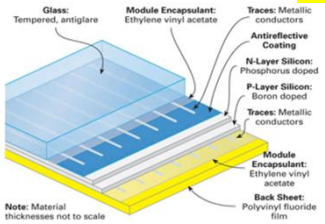
↓

技術的に可能か？

↓

共に可能である！
ケーブル寿命は絶縁材で決まる
エジソンのNY地下ケーブル > 100 years
SCDCは**low voltage & low temp.**から、長寿命

PV panelの構成材
ガラス（> 1000 years）
Si pn-junction （> 1000 years）
アルミ配線（>10000 years）
シール材 ＆ 接触抵抗 → **研究開発 NEDOの挑戦**



25

まとめ

人類に10世紀（ミレニアム）より長く利用してきた技術として、ローマの水道橋が有名　2000年以上経った今も修繕し、利用中
他にも世界各国に多くの1000年を超すインフラ等が現在も利用中



SCDC＋PVのシステムを次のミレニアムの基幹技術に！

ご清聴ありがとうございました。

26