

プレゼン  
テーション

①

9:10-9:35

# 電力貯蔵機能付き 電力輸送ケーブルの開発

九州大学大学院  
システム情報科学研究所  
電気システム工学部門

准教授 東川甲平

HIGASHIKAWA Kohei

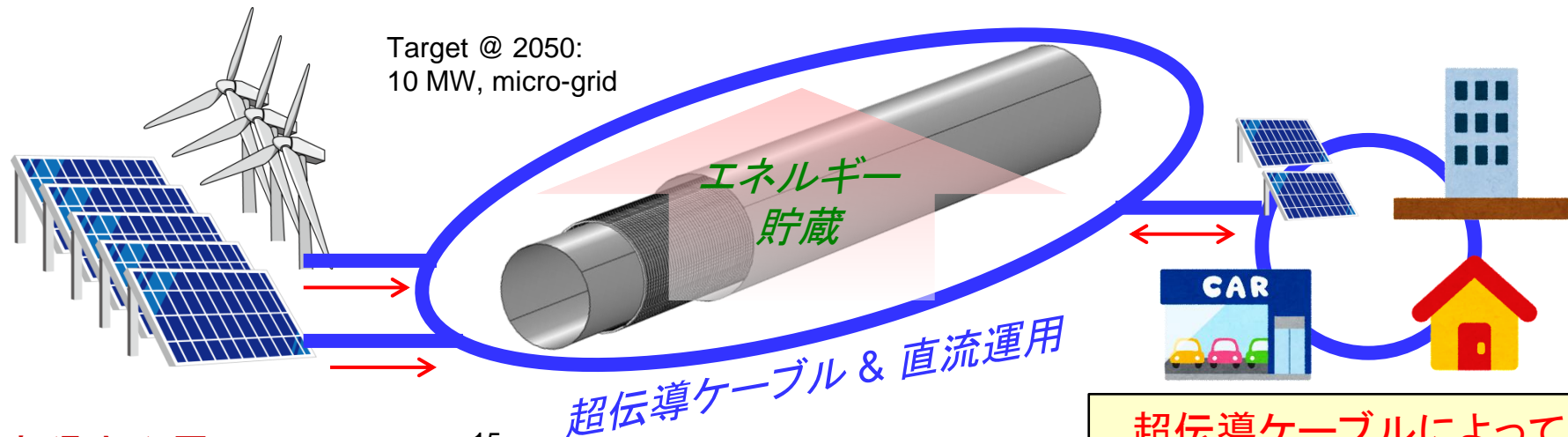
(kohei@super.ees.kyushu-u.ac.jp)

本講演の内容は、「NEDO先導研究プログラム/未踏チャレンジ2050/  
革新的エネルギーネットワーク基盤技術の創製」の成果に基づくものである。  
また設計の基礎データはJSPSの科研費(JP20H02132)による成果に基づいている。



# アウトライン(技術開発の概要)

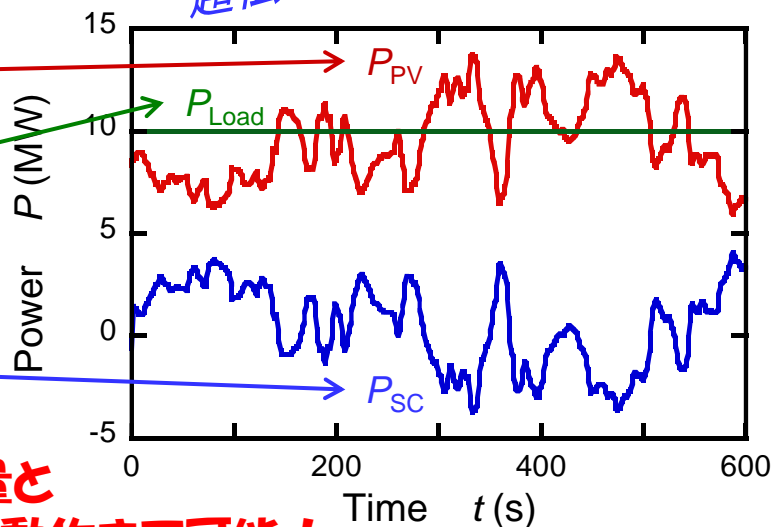
新たに提案する特殊な超伝導ケーブルとその革新的な運用により  
電力系統自体にエネルギー貯蔵・充放電機能を付与 → 再エネ大量導入の決め手に!



太陽光発電  
からの出力

平滑化  
された出力

超伝導ケーブルによる  
充放電動作



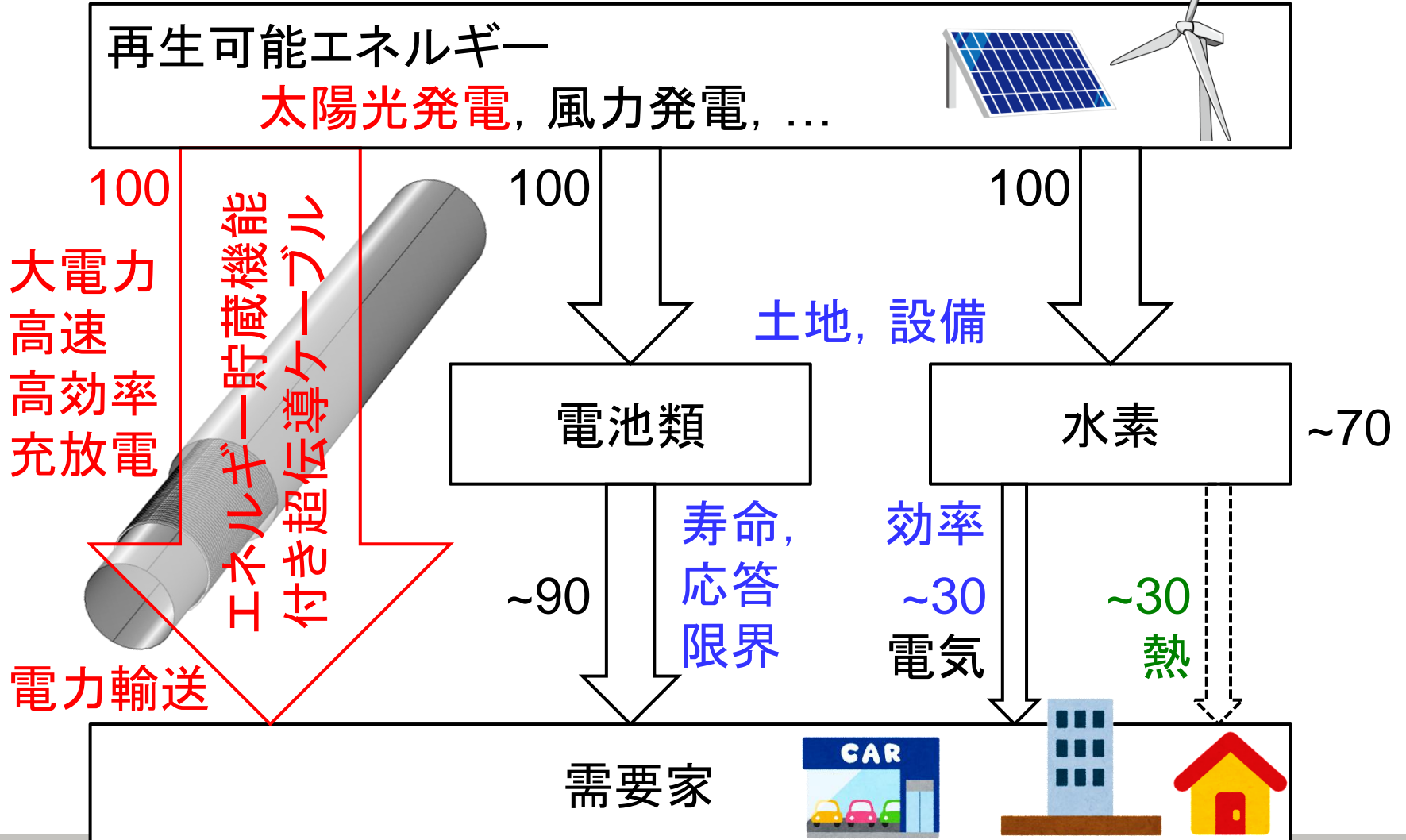
電池類なしで系統容量と  
同じオーダーの充放電動作まで可能!

超伝導ケーブルによって  
電力系統自体に  
エネルギー貯蔵機能  
を与えるという革新的な  
コンセプトを軸に激しい  
出力変動が制約となる  
再生可能エネルギーの  
大量導入を可能とする  
次世代エネルギーネット  
ワーク基盤技術を開発



# アウトライン(優位性)

再生可能エネルギーの出力変動の問題を解決し、さらに最大限のエネルギー利用を実現  
電力輸送を兼ねるため、エネルギー貯蔵にかかる付加的な損失はほぼゼロ!



# アウトライン(将来構想)

ナショプロ  
〈ベンチ・デモスケール〉  
・MW級プロトタイプの開発  
・冷却システムの開発  
・システム化

実証プラント

製造プラント

再エネ主力電源化の  
根本解決策として  
直接あるいは間接的に  
全電力にかかるCO<sub>2</sub>削減に貢献  
(電力利用分の約6億t-CO<sub>2</sub>/年  
(@日本)の削減に期待)

シーズ発掘(未踏チャレンジ)  
先導研究(エネ環)  
・要素技術の開発  
・10MW,GJ級動作の模擬

マイクログリッド内で完結した  
電力消費(地産地消)を実現  
→ 既存の電力システムに影響せず  
地域(離島を含む)ごとへの導入から  
広域展開まで見据えられるパッケージ

先進インフラとして  
海外への輸出も期待



# 目次

- 提案の背景と概要
- これまでの取り組み  
(主にNEDO未踏チャレンジ2050による成果)
- インパクトの試算
- ロードマップ  
(NEDO先導研究の位置付け)
- まとめ

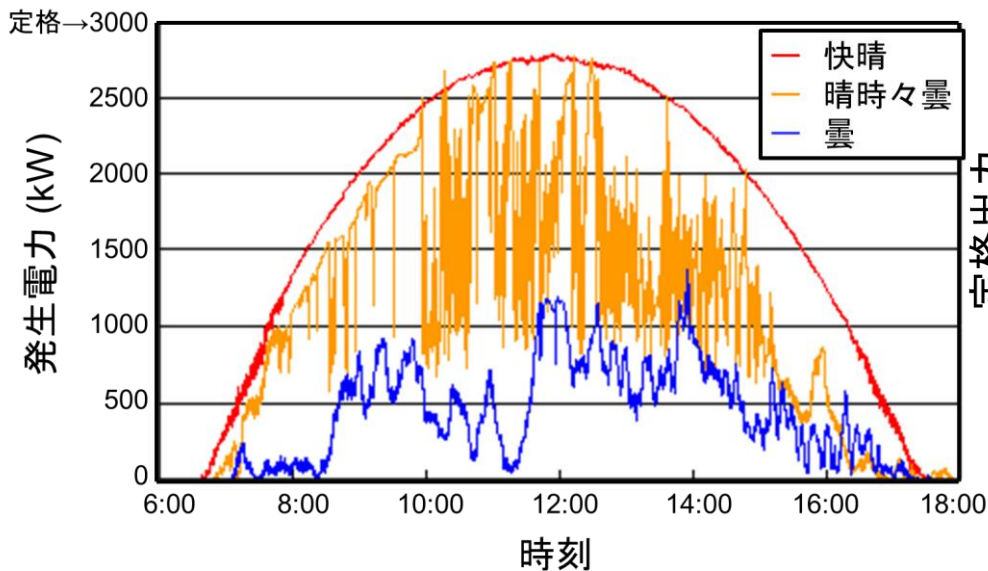
# 再生可能エネルギー大量利用の要件

再生可能エネルギーの  
激しい出力変動

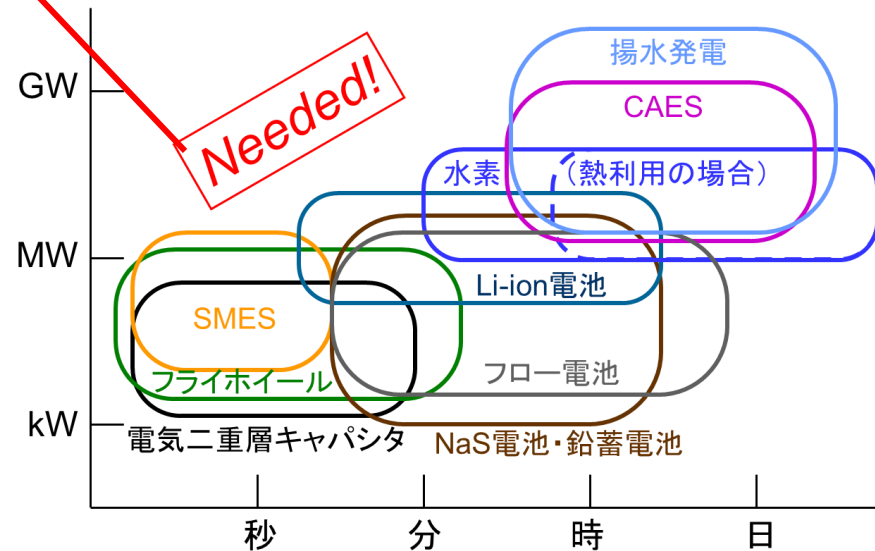
特に太陽光発電で  
10%/秒にも及ぶ  
激しい出力変動あり

再エネの主力電源化には  
数秒で全電力を補償できるような  
高速大出力容量の  
電力貯蔵技術が不可欠

既存の電力貯蔵技術では困難



太陽光発電の時間波形の例(九州電力より)



定格出力での動作時間

様々なエネルギー貯蔵技術の動作範囲(独自に集約)

# 既存技術による限界

## ① 高速かつ大出力という要件を満たせない

電力は一瞬でも絶やすことはできないが  
電池類では秒以下で最大出力を得ることは困難  
キャパシタやSMESでは大出力化が困難

## ② 充放電寿命の問題

補償対象の出力変動は頻繁なものであり、  
たとえ1日に必要な充放電回数が10回であったとしても  
代表的なリチウムイオン電池の寿命5000回では  
2年と持たない

## ③ 再エネ導入の機運を損ねかねない

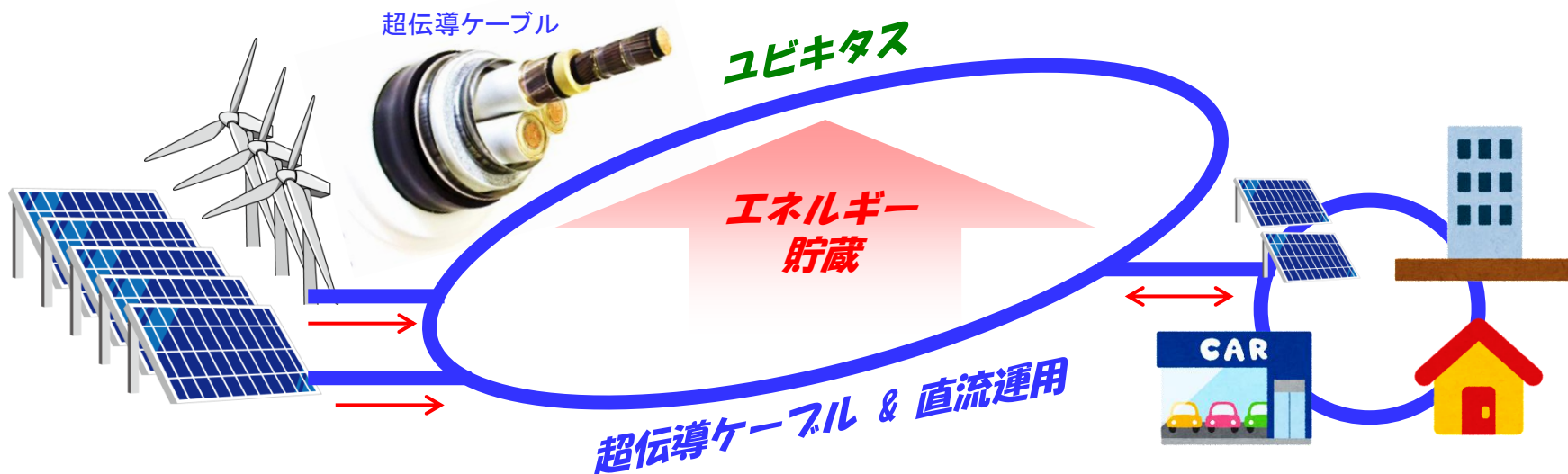
再エネ導入のごとに電力貯蔵装置を要求するような仕組みは  
再エネ利用拡大の機運を損ねかねない



# 本提案： 電力貯蔵機能付き電力輸送ケーブル

超伝導ケーブルによって電力系統自体に  
高効率・高速・大出力のエネルギー貯蔵機能を与えるという  
これまでにないコンセプトにより  
再生可能エネルギー大量利用の制約を根本的に解決

- ① 既存技術では困難な高速・大出力の出力変動補償
- ② 電力貯蔵の原理的には充放電寿命なし
- ③ 再生可能エネルギー導入時の電力貯蔵設備の逐次増強不要





# 本提案のさらなる利点

## ④ 再エネと近年の負荷に親和性の高い低電圧直流運用

超伝導技術が可能とする大電流運用により  
再エネからの電力変換が容易な低電圧化を実現  
直流運用により超伝導ケーブルは交流損失フリー

## ⑤ 電力輸送も電力貯蔵も極めて高効率

特に電力貯蔵に関しては、化学エネルギーへの変換が不要で  
電力変換器を含まない電力貯蔵にかかる効率はほぼ100%

## ⑥ 電力貯蔵にかかる付加的な土地が不要

電力輸送を兼ねる超伝導ケーブル自体が電力を貯蔵

## ⑦ スマートグリッドとしてのマルチスケール拡張性

μグリッド内で出力変動が補償されているため連系が容易

# 目次

- 提案の背景と概要
- これまでの取り組み  
(主にNEDO未踏チャレンジ2050による成果)
- インパクトの試算
- ロードマップ  
(NEDO先導研究の位置付け)
- まとめ

# 超伝導磁気エネルギー貯蔵 (SMES) ケーブル

SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage

Winding diameter  
 $d$  (mm)

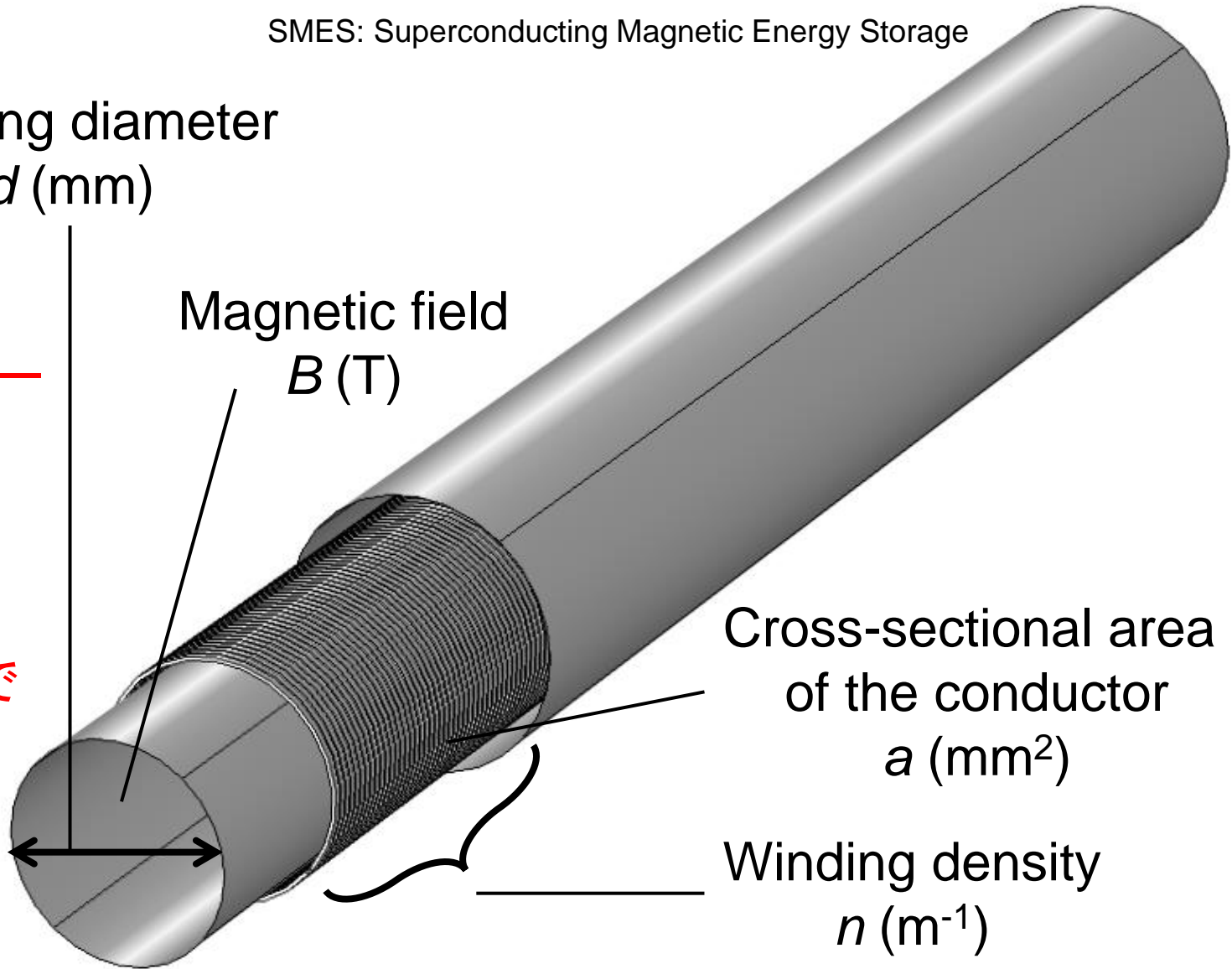
電力輸送  
のみならず  
磁気エネルギー  
を貯蔵

ケーブルの  
膨大な体積を  
利用することで  
SMESの  
弱点を解決

Magnetic field  
 $B$  (T)

Cross-sectional area  
of the conductor  
 $a$  (mm<sup>2</sup>)

Winding density  
 $n$  (m<sup>-1</sup>)



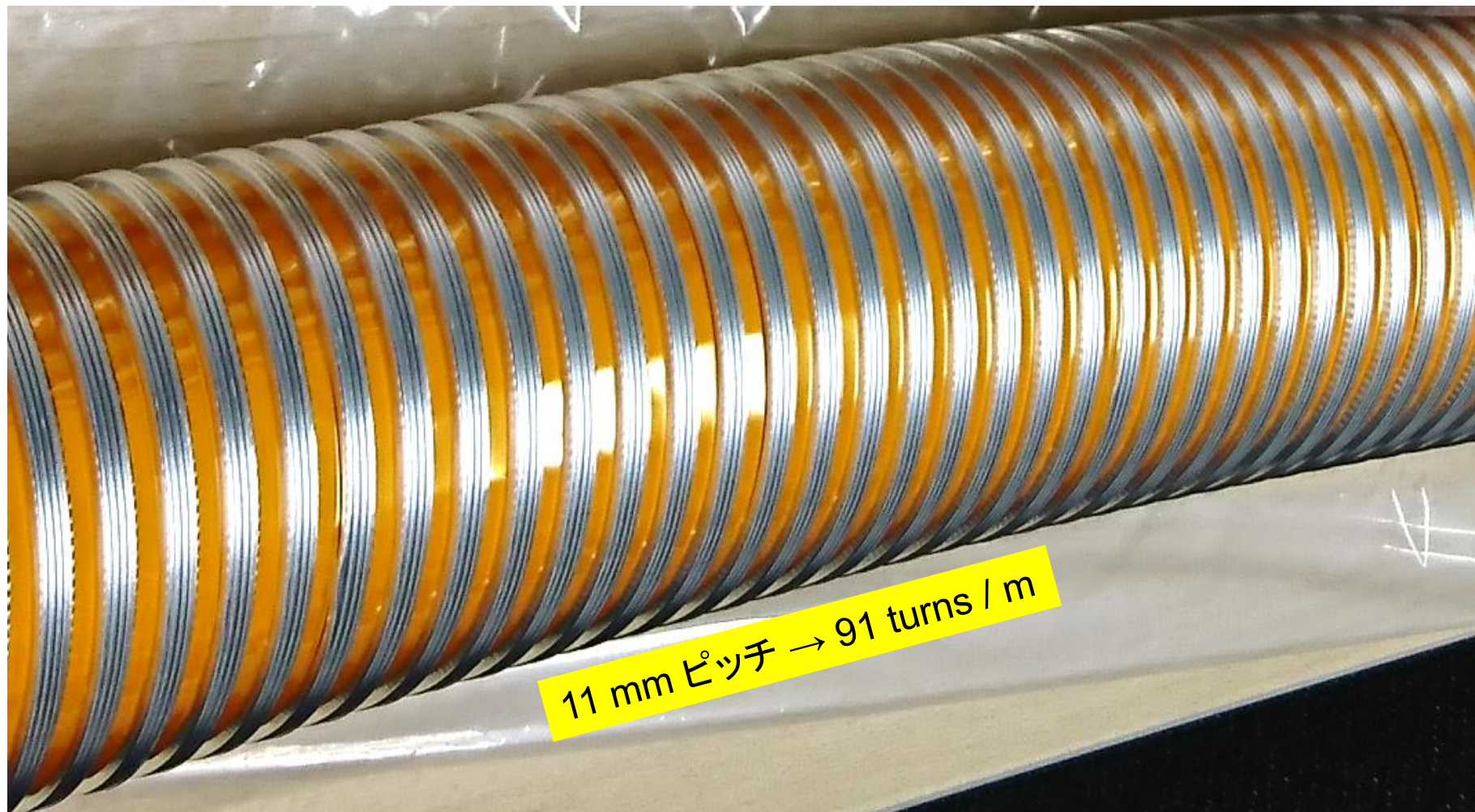


# 10 MW マイクログリッドに向けたケーブル設計

蓄積エネルギー $W$	磁界強度 $B$	コア直径 $d$	巻数 @1m $n$	導体長 @1m	インダクタンス @1m	導体断面積 $a$	機能
10 MJ	0.5 T	120 mm	40	15 m	20 $\mu$ H	4 mm <sup>2</sup> @ 65 K 13 mm <sup>2</sup> @ 77 K	蓄電池の 応答補償 (秒オーダー)
	0.3 T	200 mm	24			3 mm <sup>2</sup> @ 65 K 11 mm <sup>2</sup> @ 77 K	
40 MJ	1.15 T	105 mm	91	30 m	80 $\mu$ H	5 mm <sup>2</sup> @ 65 K	
1 GJ	5 T	120 mm	400	150 m	2 mH	5 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 13 mm <sup>2</sup> @ 65 K	燃料電池 ならびに ガスタービンの 応答補償 (分オーダー)
	3.5 T	200 mm	240			6 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 7 mm <sup>2</sup> @ 65 K	
100 GJ	20 T	300 mm	1600	1.5 km	0.2 H	50 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮)	日負荷平準化 (時間オーダー)
	8.5 T	700 mm	680			50 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 50 mm <sup>2</sup> @ 65 K (応力による制限も考慮)	

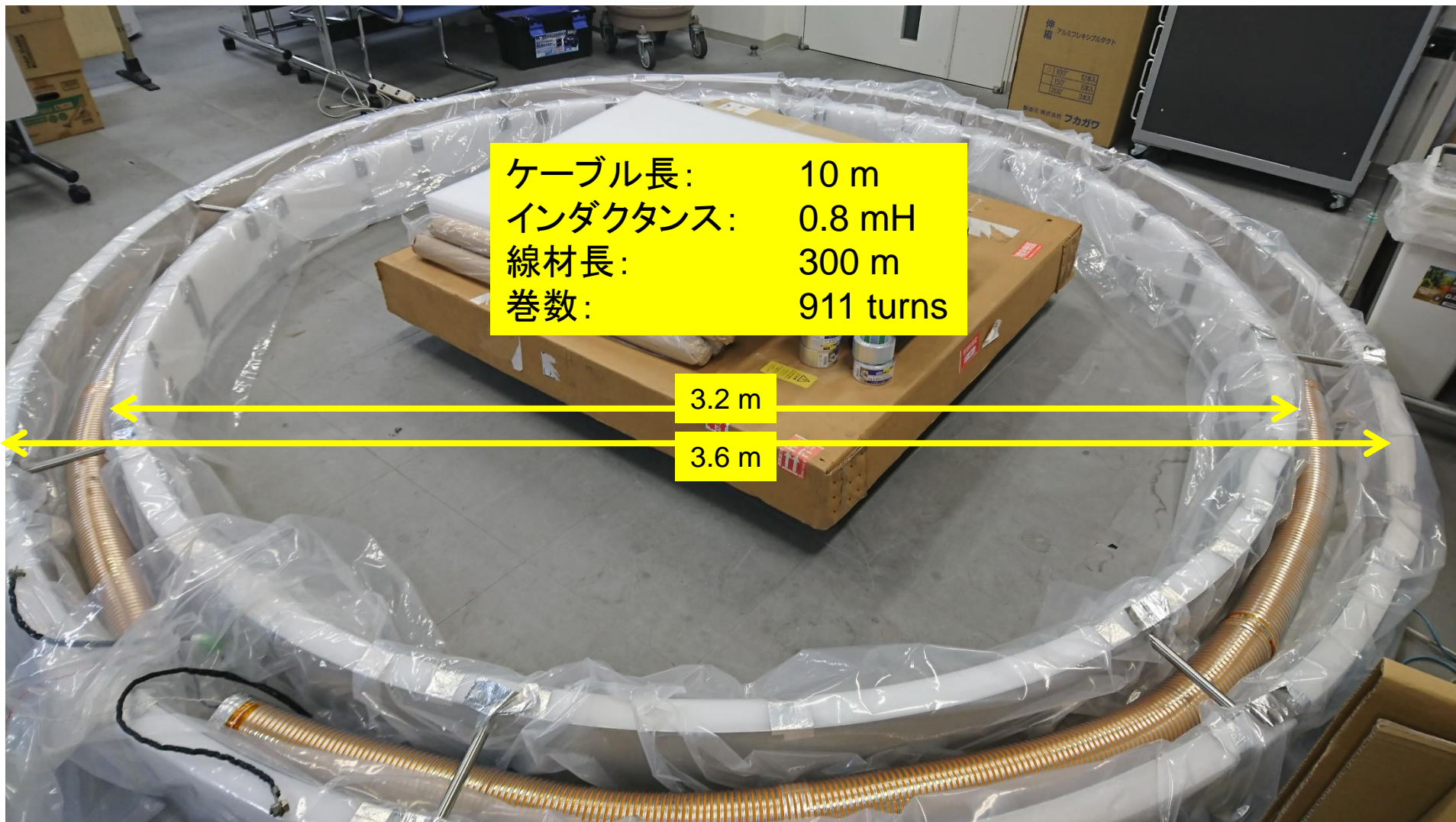
# モデルケーブルの製作

市販の高温超伝導テープ線材(4mm幅, ポリイミド絶縁あり)をフレキシブルな溝入りコアに巻線

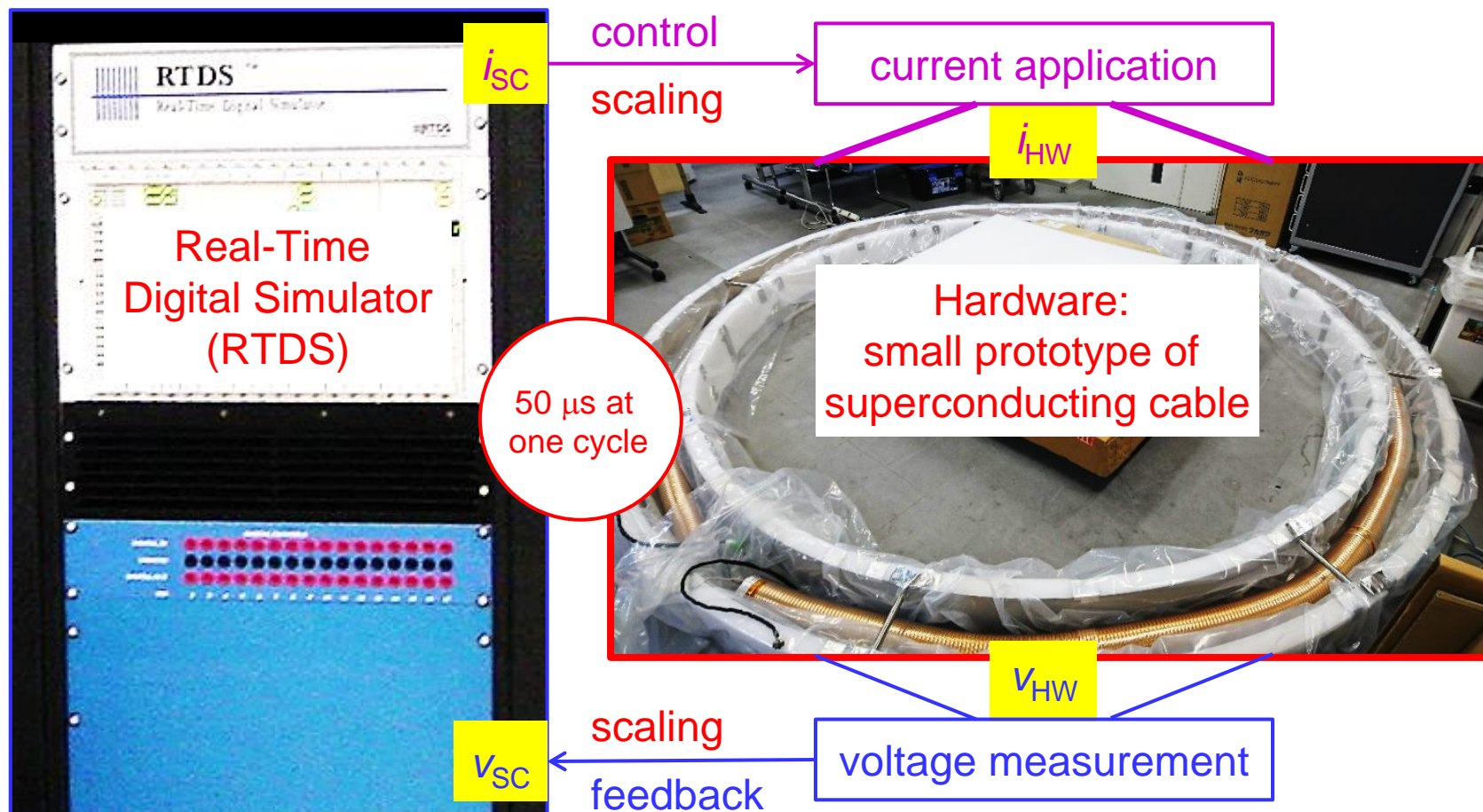


# モデルケーブルの製作（液体窒素容器への設置）

搬送時や敷設時に必要となる曲げに対する試験を兼ねる

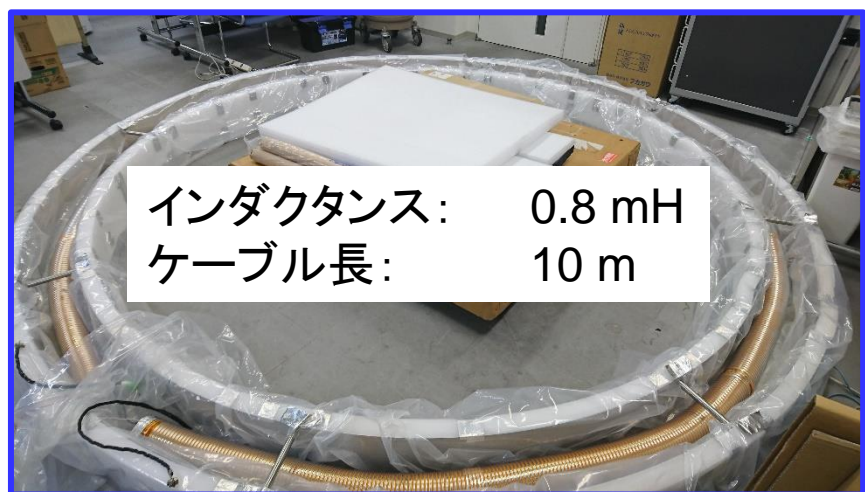
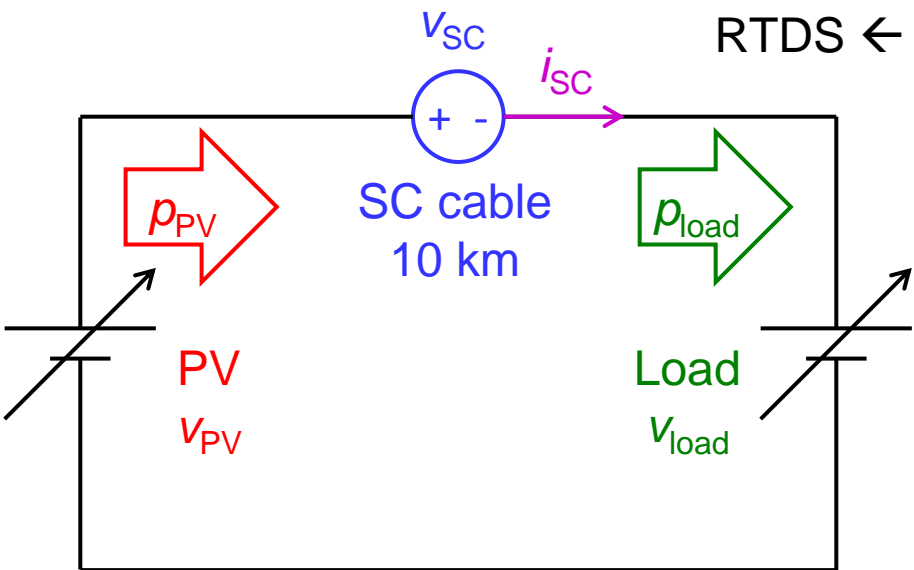


# ハードウェア閉ループ試験 (HILS) の概略図





# ハードウェア閉ループ試験 (HILS) における規模調整



$$v_{sc} = L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} + R_{sc} i_{sc}$$

$$e(j) = L_{1m} \frac{di_{sc}}{dt} + \rho(j)j$$

$$v_{HW} = L_{HW} \frac{di_{HW}}{dt'} + R_{HW} i_{HW}$$

$$e(j) = L_{1m} \frac{di_{HW}}{dt'} + \rho(j)j$$

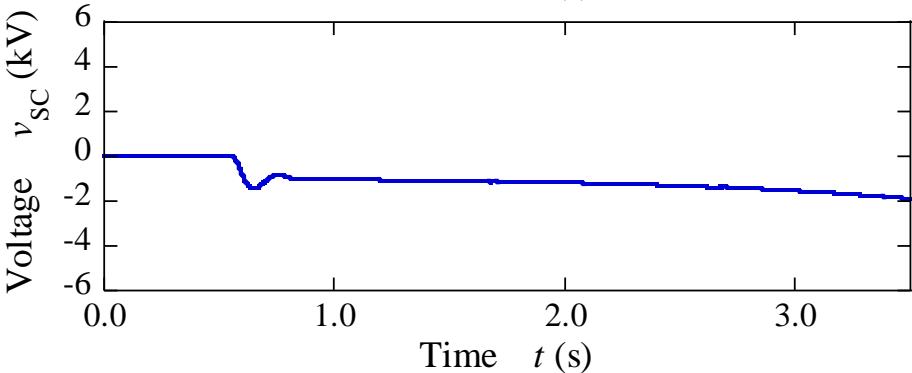
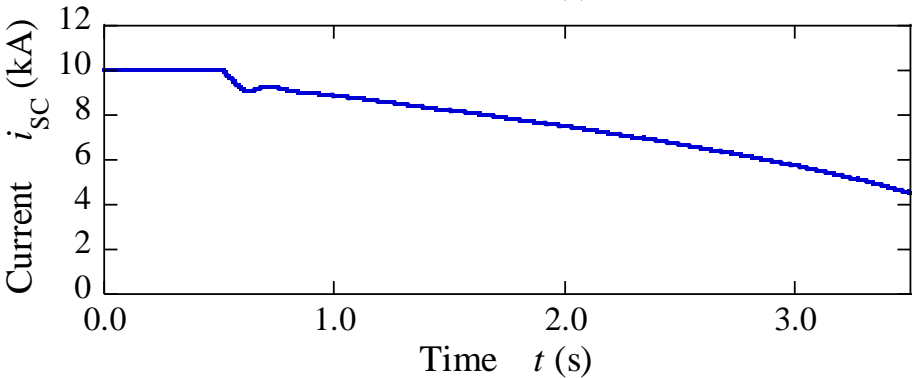
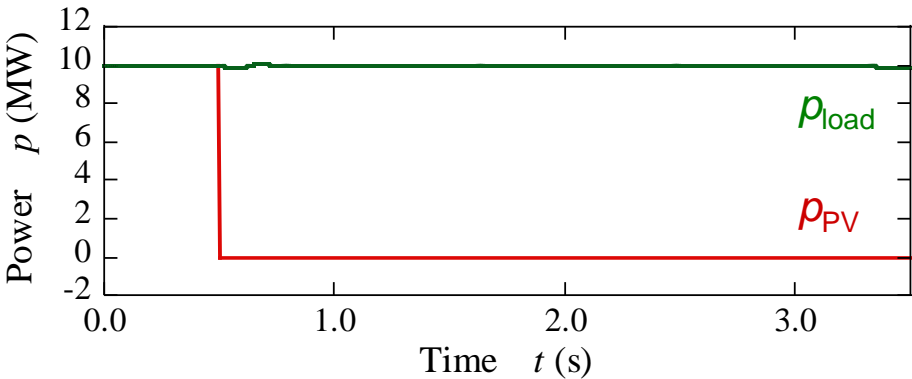
電流 (定格):  $i_{sc} = 10 \text{ kA}$  →  
 時間スケール:  $t$  →  
 電圧 (ケーブル長):  $v_{sc}$  (10 km分) ←  
 時間スケール:  $t$  ←

**規模調整**

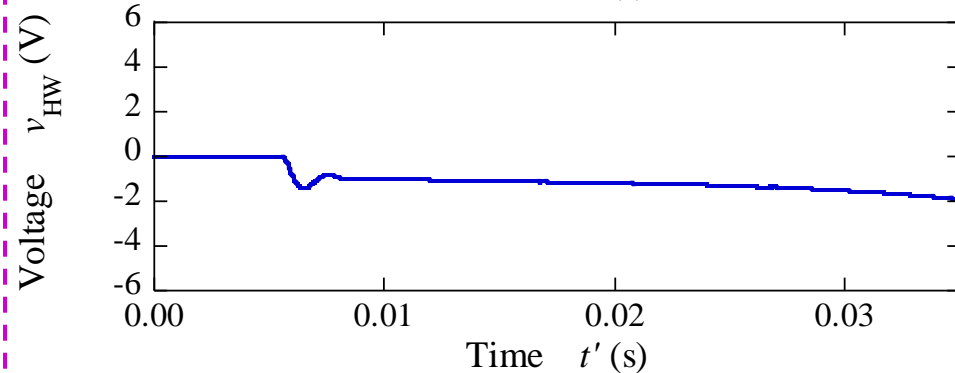
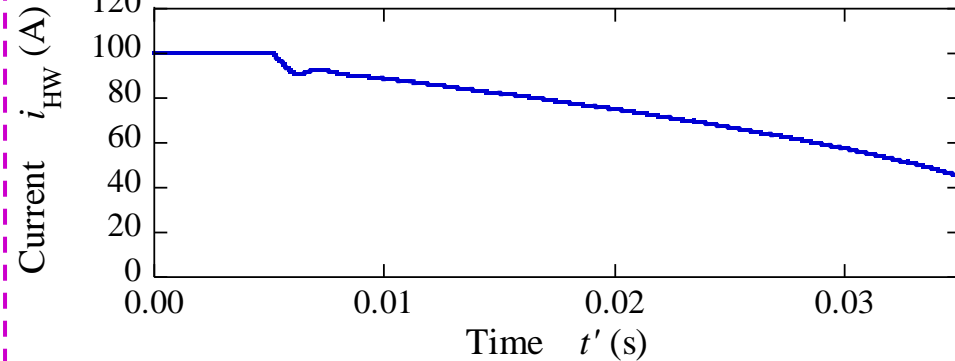
$i_{HW} = 100 \text{ A}$  1/100  
 $t'$  1/100  
 $v_{HW}$  (10 m分) 1000  
 $t'$  100

# ハードウェア閉ループ試験 (HILS) (放電時)

Real Time Digital Simulator: RTDS ← → Hardware

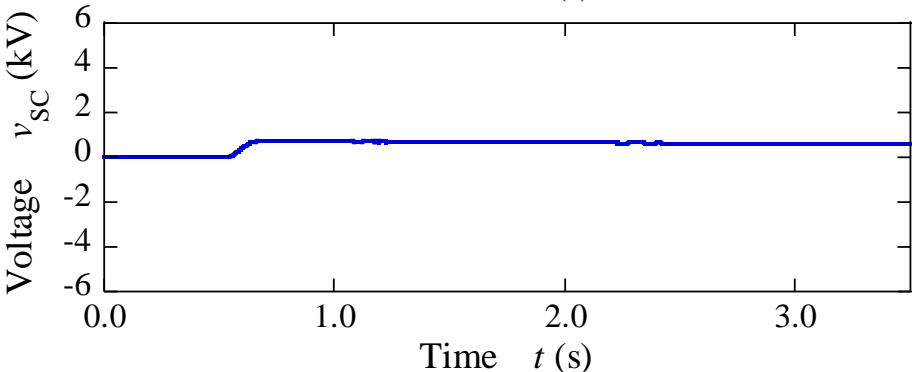
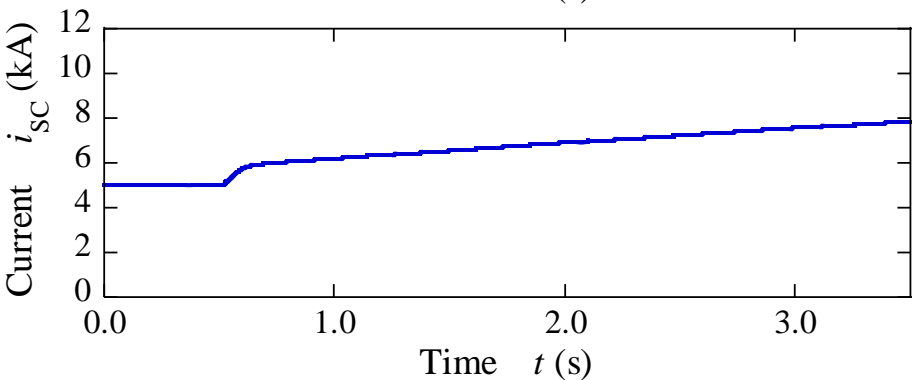
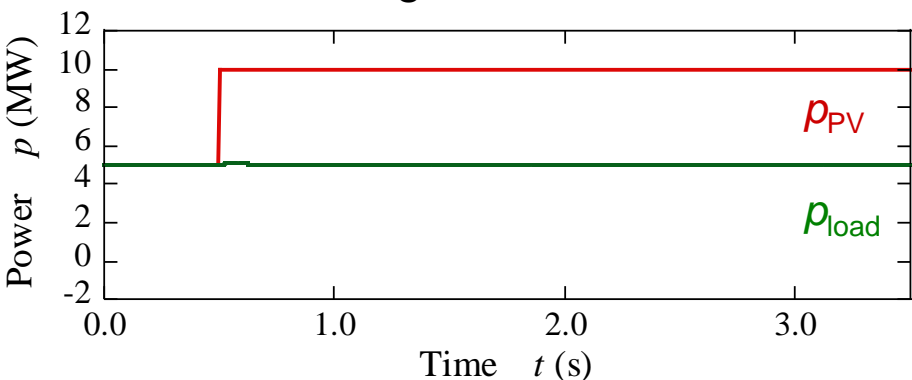


究極の負荷変動補償機能  
(全電力の瞬時補償)を確認

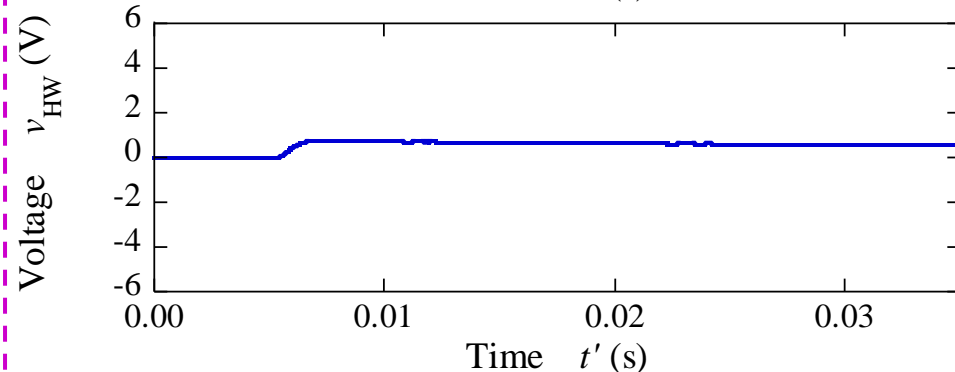
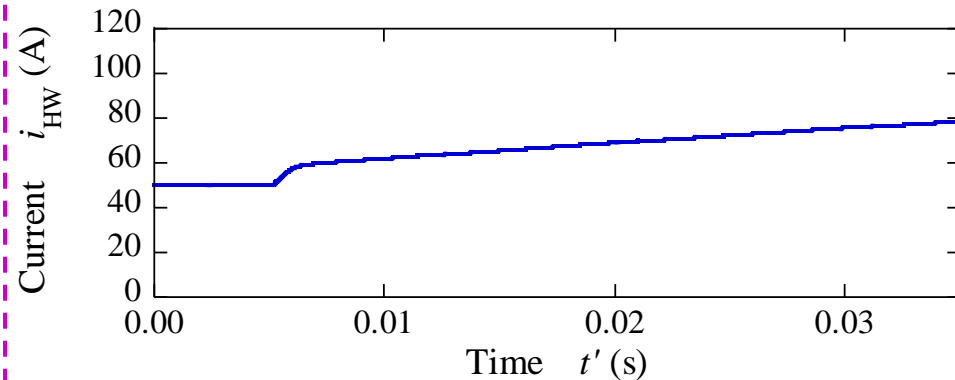


# ハードウェア閉ループ試験 (HILS) (充電)

Real Time Digital Simulator: RTDS ← → Hardware



究極の負荷変動補償機能  
(全電力の瞬時補償)を確認



# 10 MW マイクログリッドに向けたケーブル設計

蓄積エネルギー $W$	磁界強度 $B$	コア直径 $d$	巻数 @1m $n$	導体長 @1m	インダクタンス @1m	導体断面積 $a$	機能
10 MJ	0.5 T	120 mm	40	15 m	20 $\mu$ H	4 mm <sup>2</sup> @ 65 K 13 mm <sup>2</sup> @ 77 K	蓄電池の 応答補償 (秒オーダー)
	0.3 T	200 mm	24			3 mm <sup>2</sup> @ 65 K 11 mm <sup>2</sup> @ 77 K	
40 MJ	1.15 T	105 mm	91	30 m	80 $\mu$ H	5 mm <sup>2</sup> @ 65 K	
1 GJ	5 T	120 mm	400	150 m	2 mH	5 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 13 mm <sup>2</sup> @ 65 K	燃料電池 ならびに ガスタービンの 応答補償 (分オーダー)
	3.5 T	200 mm	240			6 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 7 mm <sup>2</sup> @ 65 K	
100 GJ	20 T	300 mm	1600	1.5 km	0.2 H	50 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮)	日負荷平準化 (時間オーダー)
	8.5 T	700 mm	680			50 mm <sup>2</sup> @ 20 K (応力による制限も考慮) 50 mm <sup>2</sup> @ 65 K (応力による制限も考慮)	



# 2 mH/m モデルケーブルの製作



線材: 4 mm 幅絶縁 x ~130 m  
巻数: ~400 turns / m

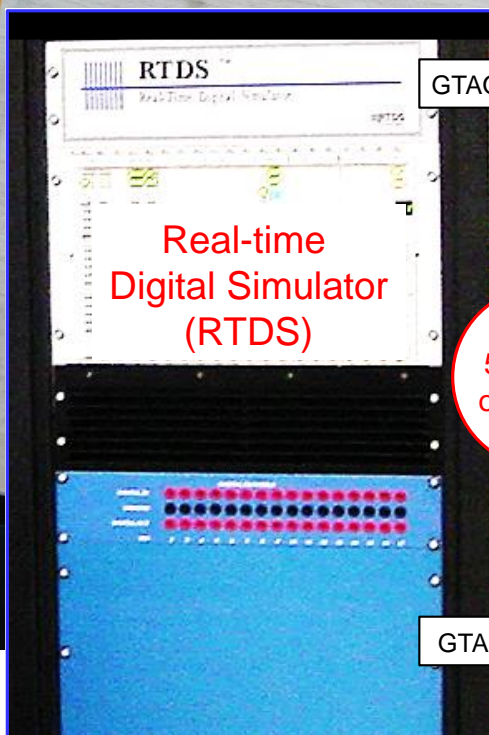
1層目: 210 turns  
2層目: 210 turns

曲げられる →



# 2 mH/m のモデルケーブルによるHILS

1 m, 400 turns



GTAO

Control

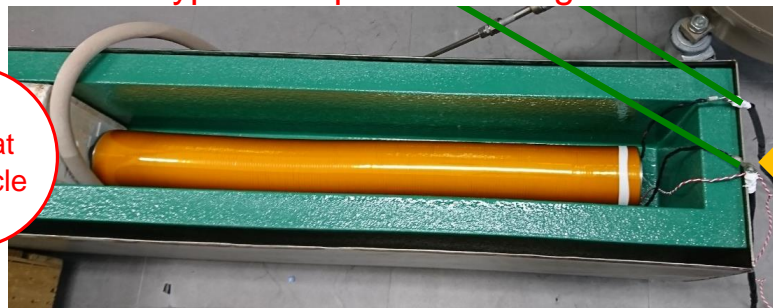
Scaling

(10 kA → 100 A)

Current source

Prototype of Superconducting Cable

50  $\mu$ s at one cycle



(10 km ← 1 m)

Scaling

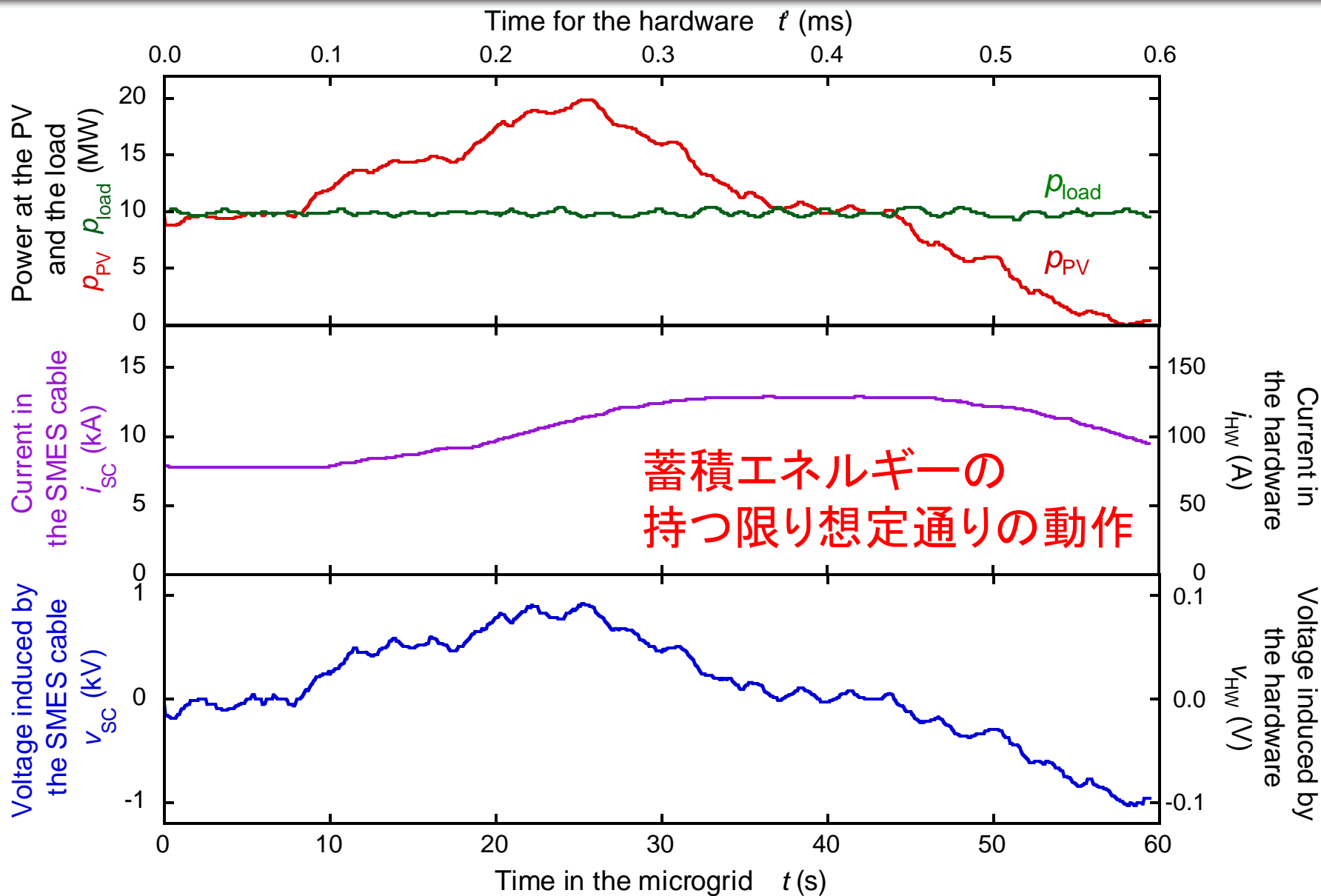
Feedback

Voltage

GTAI



# 2 mH/m のモデルケーブルによるHILSの結果



# 未踏チャレンジ2050の取り組みに関係する評価

平成31年度  
文部科学大臣表彰  
若手科学者賞, 2019.04.

ICMC Cryogenic Materials  
Award for Excellence,  
International Cryogenic  
Materials Conference, 2019.07.

招待講演:

- Applied Superconductivity Conference, Seattle, USA
- 36th International Symposium on Superconductivity, NZ  
(ほか8件)

特許:

- 特願2021-120933
- PCT/JP2022/027364





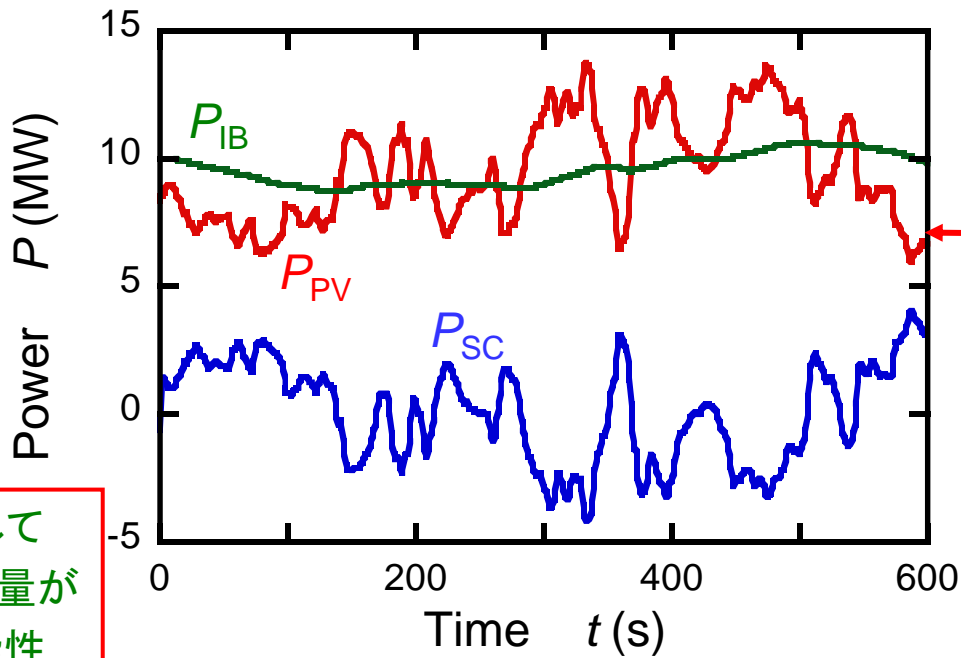
# 目次

- 提案の背景と概要
- これまでの取り組み  
(主にNEDO未踏チャレンジ2050による成果)
- **インパクトの試算**
- ロードマップ  
(NEDO先導研究の位置付け)
- まとめ

# PV変動補償: 1 GJ @ 10 km 級(無制御)

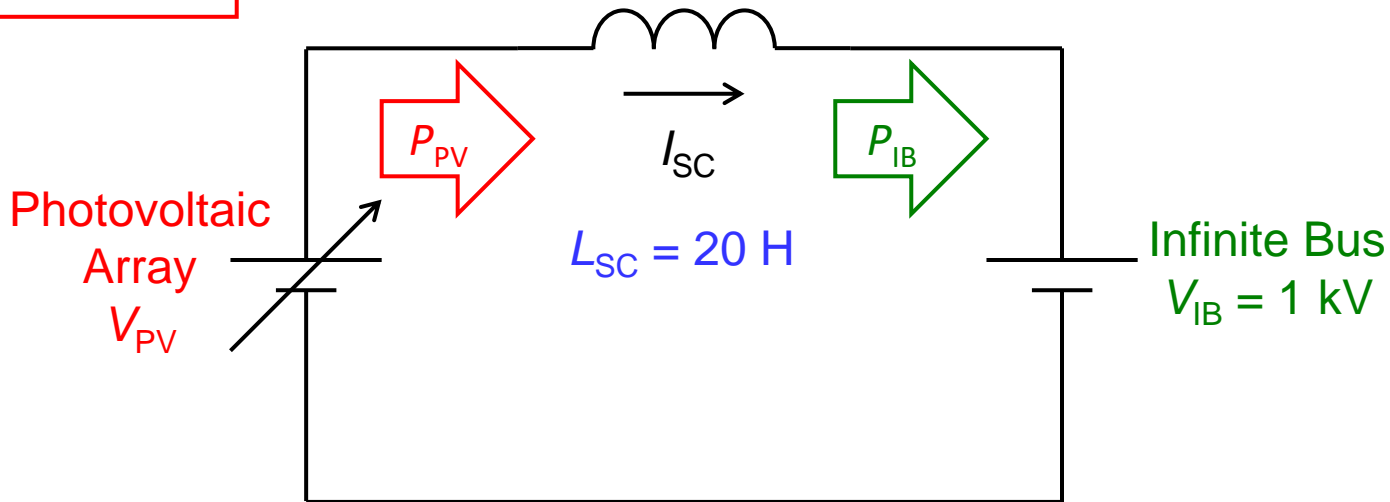
電池無しで  
平滑化!  
5%/秒 →  
0.15%/秒

PV設備容量に対して  
ケーブルの送電容量が  
小さくても良い可能性



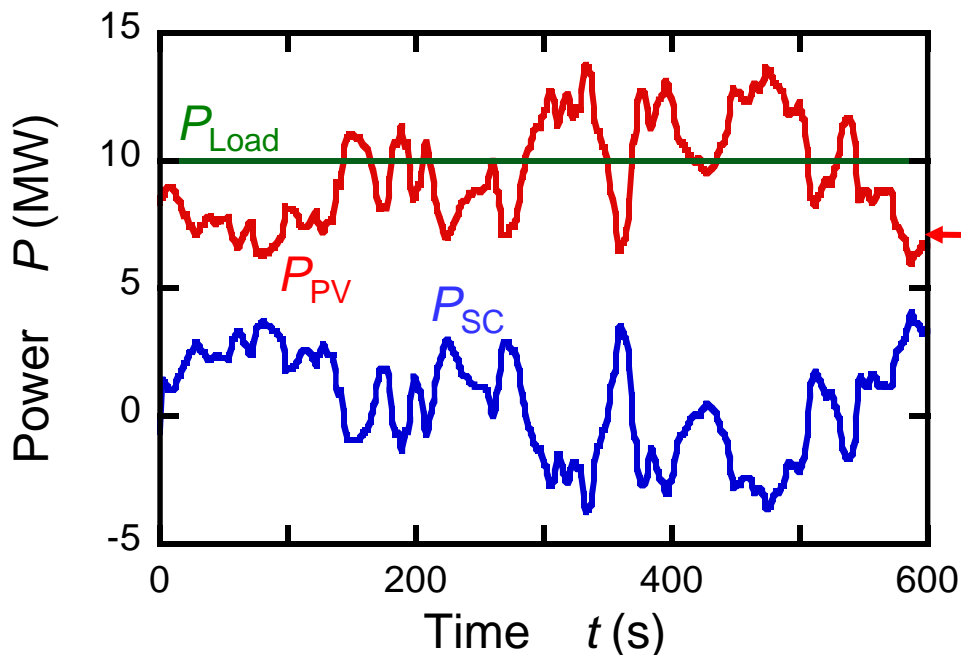
八戸市  
水の流れを電気で返すプロジェクト  
NEDO  
×  
10

4 MW にも  
及ぶ入出力



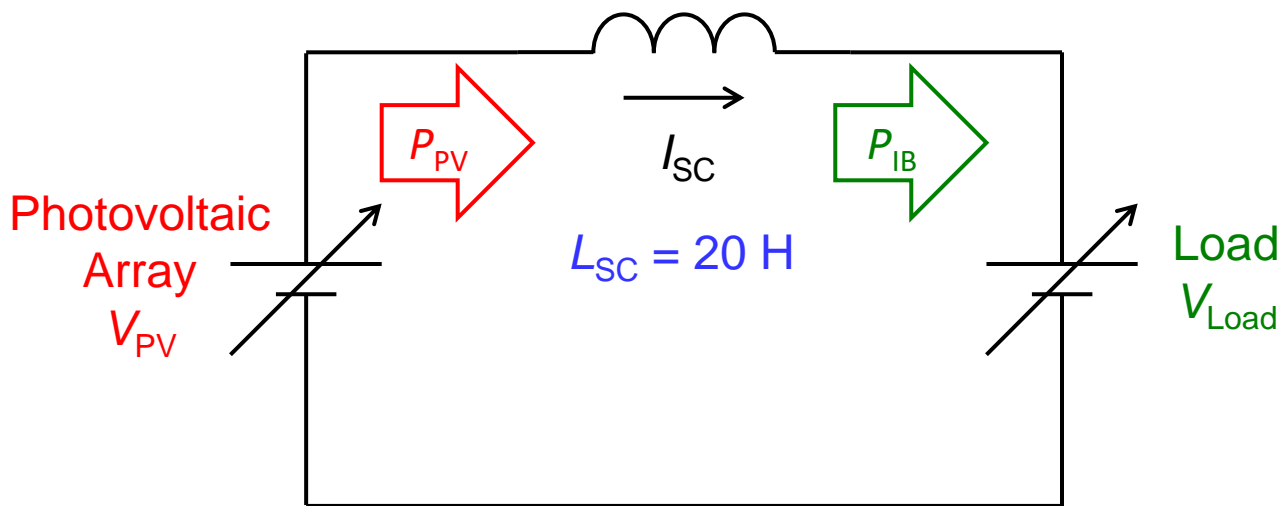
# PV変動補償: 1 GJ @ 10 km 級

電池無しで  
平滑化!  
5%/秒 →  
0.0%/秒



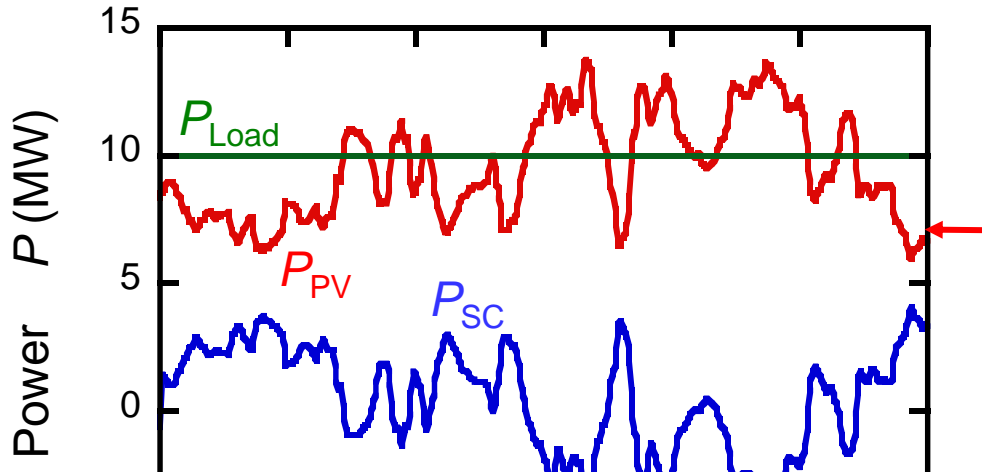
八戸市  
水の流れを電気で返すプロジェクト  
NEDO  
×  
10

4 MW にも  
及ぶ入出力



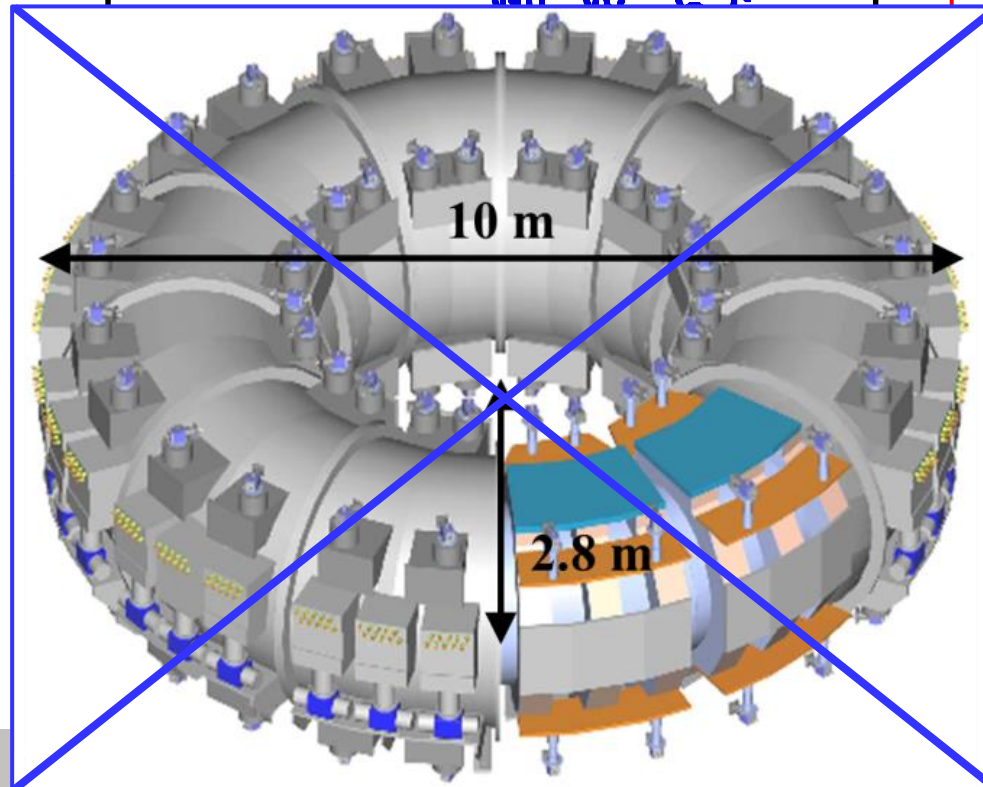
# PV変動補償: 1 GJ @ 10 km 級

電池無しで  
平滑化!  
5%/秒 →  
0.0%/秒

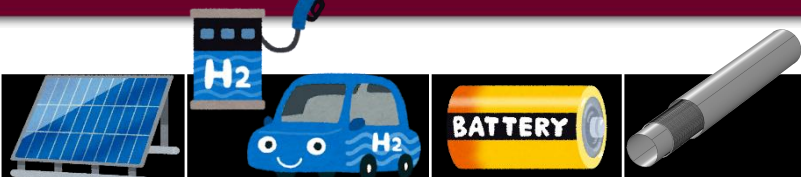


八戸市  
水の流れを電気で返すプロジェクト  
NEDO  
×  
10

4 MW にも  
及ぶ入出力



# 様々な電源構成の比較（需給バランスと効率）



Case	PV	hydrogen	battery	SMES cable	supply-demand balancing	energy utilization efficiency (clear sometimes cloudy day)	energy utilization efficiency (clear day)
Case A	10 MW	10 MW	-	-	NG	-	-
Case B	10 MW	10 MW	10 MW	-	NG	-	-
Case C	10 MW	10 MW	10 MW	40 MJ	OK	37%	42%
Case D	10 MW	10 MW	-	1 GJ	OK	38%	42%
Case E	-	10 MW	-	-	OK	30%	30%

昼間の太陽光発電のリアルタイムな利用により  
 一度すべてを水素としてエネルギーを貯蔵するよりも  
 年平均3割程度のエネルギー効率の向上



グリーン水素の使用量とその生成にかかる再エネ導入量の削減

# 様々な電源構成の比較 (30年コスト@10MW-μG)

Case	PV	green hydrogen	battery	SMES cable	Cost for 30 years
Case C	10 MW 0.52 TWh 104億円 @20円/kWh 52億円 @10円/kWh	10 MW 1.28 TWh 1280億円 @100円/kWh 384億円 @30円kWh	10 MW / 5 MWh 2 replaces 30億円 @ 10万円/kW + 10万円/kWh	40 MJ  ?  ?	40 MJ SMES cable + 1414億円 @現状コスト単価 466億円 @将来コスト単価
Case D	10 MW 0.52 TWh 104億円 @20円/kWh 52億円 @10円/kWh	10 MW 1.23 TWh 1230億円 @100円/kWh 369億円 @30円kWh	-	1 GJ  ?  ?	1 GJ SMES cable + 1334億円 @現状コスト単価 421億円 @将来コスト単価
Case E	-	10 MW 1.75 TWh 1750億円 @100円/kWh 525億円 @30円kWh	-	-	1750億円 @現状コスト単価 525億円 @将来コスト単価

# 様々な電源構成の比較 (30年コスト@10MW-μG)

Case	PV	green hydrogen	battery	SMES cable	Cost for 30 years
Case C	<p>現状コストで300億円程度 将来コストで50億円程度 でコスト面でもメリット有</p>			40 MJ	40 MJ SMES cable + 1414億円 @現状コスト単価 466億円 @将来コスト単価
				?	?
Case D	<p>現状コストで400億円程度 将来コストで100億円程度 でコスト面でもメリット有</p>			1 GJ	1 GJ SMES cable + 1334億円 @現状コスト単価 421億円 @将来コスト単価
				?	?
Case E	<p>日本全国(100GW系統)ではこの1万倍の効果</p>				

# 目次

- 提案の背景と概要
- これまでの取り組み  
(主にNEDO未踏チャレンジ2050による成果)
- インパクトの試算
- **ロードマップ**  
(NEDO先導研究の位置付け)
- まとめ

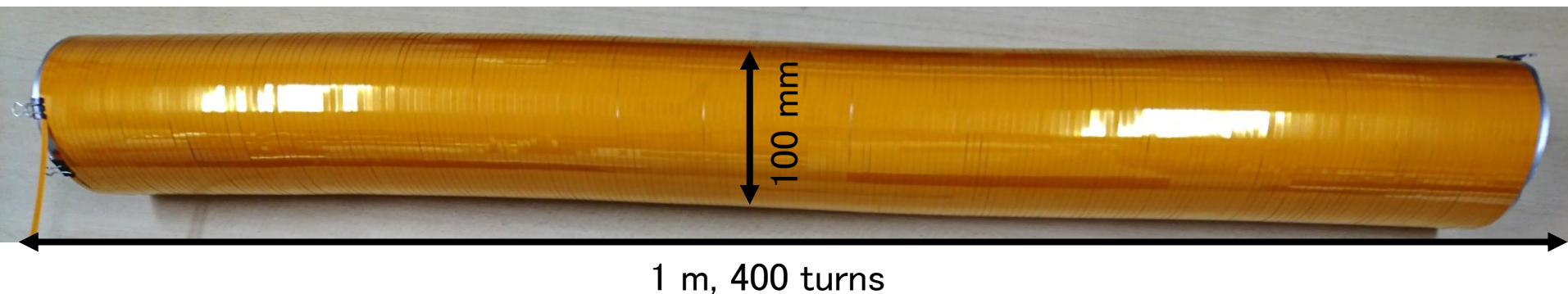


# ロードマップ

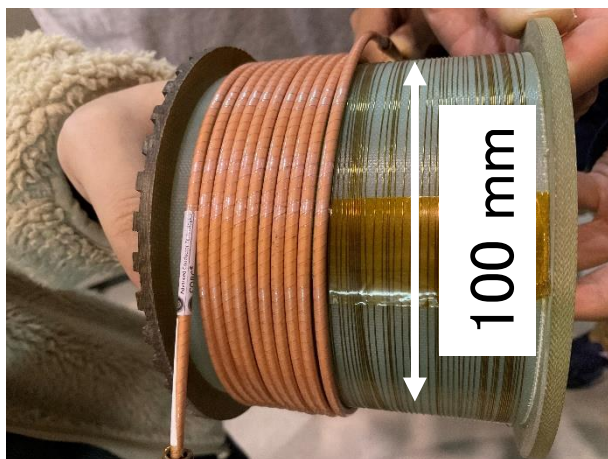
時期	2022	2025	2030	2035	2040
枠組み	NEDO未踏 チャレンジ2050	NEDO先導研究 (希望)	国プロ等 (希望)	国プロ等 (希望)	実展開 開始
規模	100 A 級 kW 級 10 m 級	kA 級	MW 級 100 m 級	10 MW 級 km 級	10 kA 級 10 MW 級 10 km 級
体制	<u>申請時応援:</u> ・三菱電機 ・東芝 ・フジクラ ・電線メーカーS1 ・電力会社C  <u>研究開発推進委員:</u> ・九州大学 ・住友電気工業 ・中部電力 ・核融合研 ・物質材料研究機構  <u>外部有識者:</u> ・九州電力 ・NTTデータ先端技術 ・前川製作所	<u>想定する研究体制(役割):</u> ・九州大学(統括・機能実証) ・電線メーカーS2(ケーブル) ・前川製作所(冷却システム) ・核融合研(大電流導体) ・物質材料研究機構(接続)  <u>アドバイザー:</u> ・九州電力 ・DC Power Vil. ・...			

# 大電流化の検討例

これまでに製作していたモデルケーブル  
(RE-123テープ線材, 断面積: 約  $0.6 \text{ mm}^2$  ( $4 \text{ mm} \times 0.15 \text{ mm}$ ))



大電流導体の巻線  
(CORC<sup>®</sup>ケーブル, 断面積:  $7.74 \text{ mm}^2$  (直径  $3.14 \text{ mm}$ ))



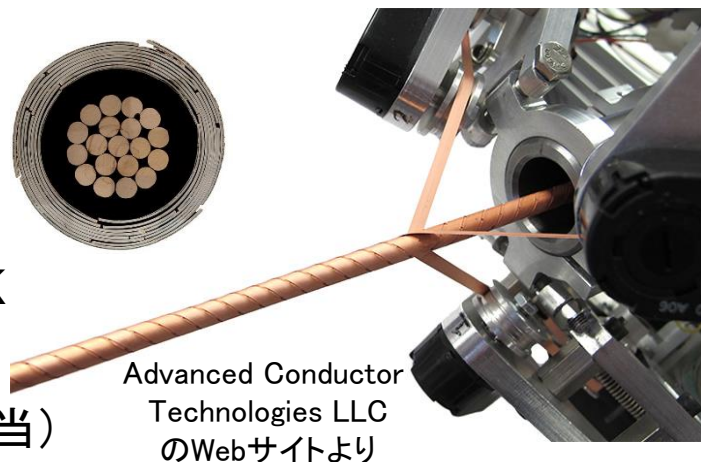
用いた導体の諸元:

2 mm 幅 30ミクロン基板  
線材12枚バンドル

Nominal  $I_c$ : 670 A @ 77K

Expected  $I_c$ : 500-600 A

(20 K では 10 kA級 に相当)



# 目次

- 提案の背景と概要
- これまでの取り組み  
(主にNEDO未踏チャレンジ2050による成果)
- インパクトの試算
- ロードマップ  
(NEDO先導研究の位置付け)
- **まとめ**

# まとめ

- 技術開発の概要、優位なポイント、  
技術開発はどの段階にあるか (cf.TRLについて)
  - ・ 電力輸送媒体が他では困難な大電力・高速・高効率充放電
  - ・ TRL3：技術コンセプトの確認、要素技術の構想 が完了
- 達成すべき技術課題、技術開発の必要性
  - ・ kA級プロトタイプケーブルによる再エネ出力補償機能実証
- 目指すべき社会像 (社会実装のイメージ、ロードマップ等)
  - ・ カーボンニュートラル時代の基盤的エネルギーインフラ
  - ・ 100A級 @ 2022 → kA級 @ 2025 → MW級 @ 2030  
→ 実規模 (10MW) 級 @ 2035 → 導入開始 @ 2040
- 波及効果、インパクトの試算 (可能な範囲で)
  - ・ 全電力の再エネ利用に直／間接的に貢献 (約6億t-CO<sub>2</sub>/年)
  - ・ 50~400億円 @ 10MW, 30年 = 2~13兆円 @ 100GW, 年

