

直流送電の温故知新

東京工業大学 工学院
電気電子系 助教

佐野 憲一郎

産学合同セミナー
2023年5月9日



「温故知新」とした理由

本セミナーの私の目標:「新しきを知る」

- これから直流送電に携わる方々と, 魅力と将来性を共有したい
- これまで直流送電に関わった方々と, 未来を語り合いたい

今日の講演:「故きを温ねる」

1. 直流送電入門
2. 直流送電の現在 ~2地点間の送電線として~
3. 直流送電の将来 ~電力系統の広域運用のために~
4. 直流送電に関する学問分野

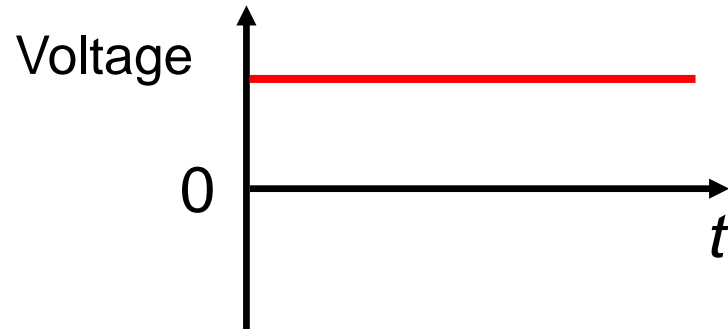


1. 直流送電入門

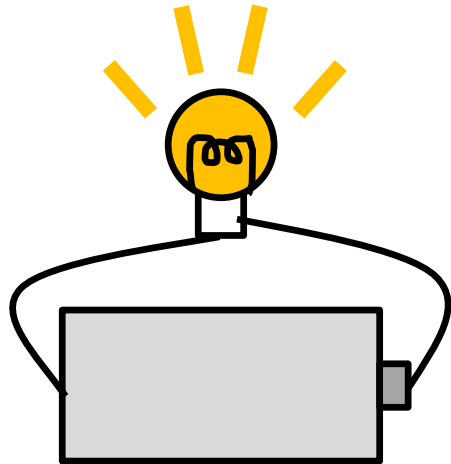


直流と交流

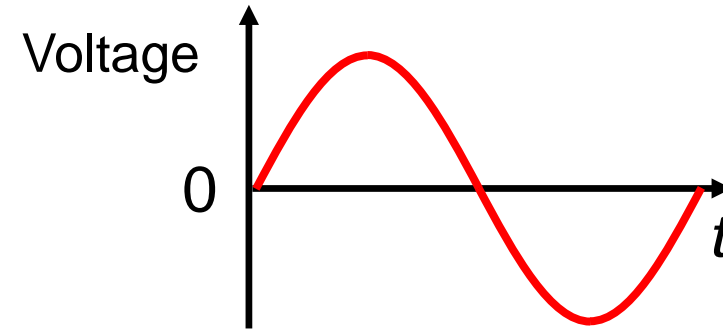
直流 (DC: Direct Current)



T. Edison



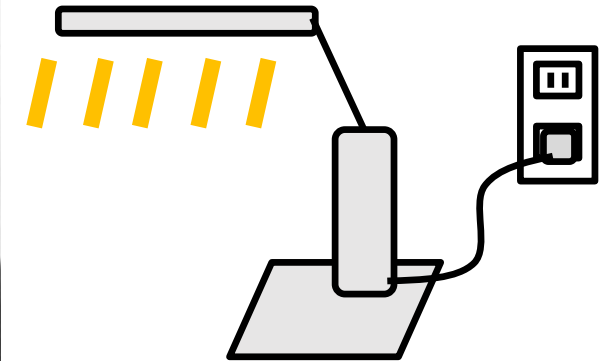
交流 (AC: Alternating current)



N. Tesla



G. Westinghouse



130年前に直流/交流を選んだ理由 [1]

映画『エジソンズ・ゲーム
(The Current War)』
(2017公開) もオススメ!

Q:なぜGE (Edison)は直流を選んだ?

- モーターを回すため
当時は**直流モーター**が主流

Q:なぜWestinghouse (Tesla)は交流を選んだ?

- モーターを回すため
Teslaは**誘導モーター**の研究者
回転磁界を作れる交流に着目



130年前に直流/交流を選んだ理由 [1]

映画『エジソンズ・ゲーム
(The Current War)』
(2017公開) もオススメ!

Q:なぜGE (Edison)は直流を選んだ?

- モーターを回すため
当時は**直流モーター**が主流

Q:なぜ直流は廃れた?

- **昇降圧が困難**なため, 利用拡大に伴い電線の**太線化**が不可避
- 直流→交流の**変換**は困難

現在, **パワーエレクトロニクス**が
これらの課題を克服した

Q:なぜWestinghouse (Tesla)は交流を選んだ?

- モーターを回すため
Teslaは**誘導モーター**の研究者
回転磁界を作る交流に着目

Q:なぜ交流は残った?

- **変圧器** (1884)と**がいし**の改良により高電圧送電が可能に
- **水銀整流器** (1900)で交流→直流の変換が可能に



交流送電と直流送電

架空送電線 による 交流送電



これでは送電できないところがある

海底ケーブル による 直流送電

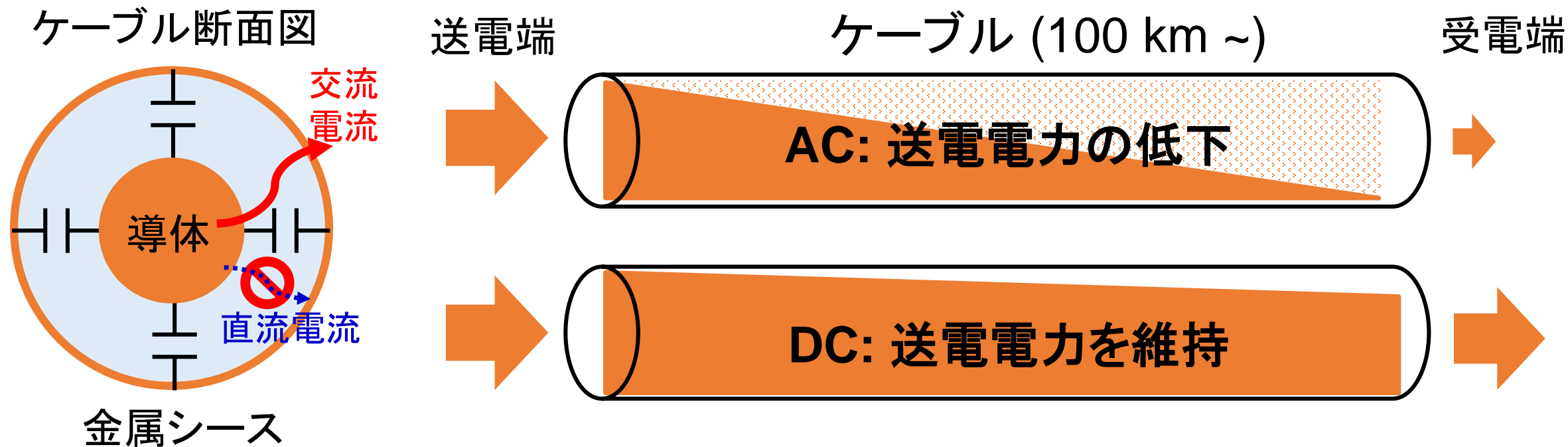


海底ケーブル

図出典: 住友電気工業



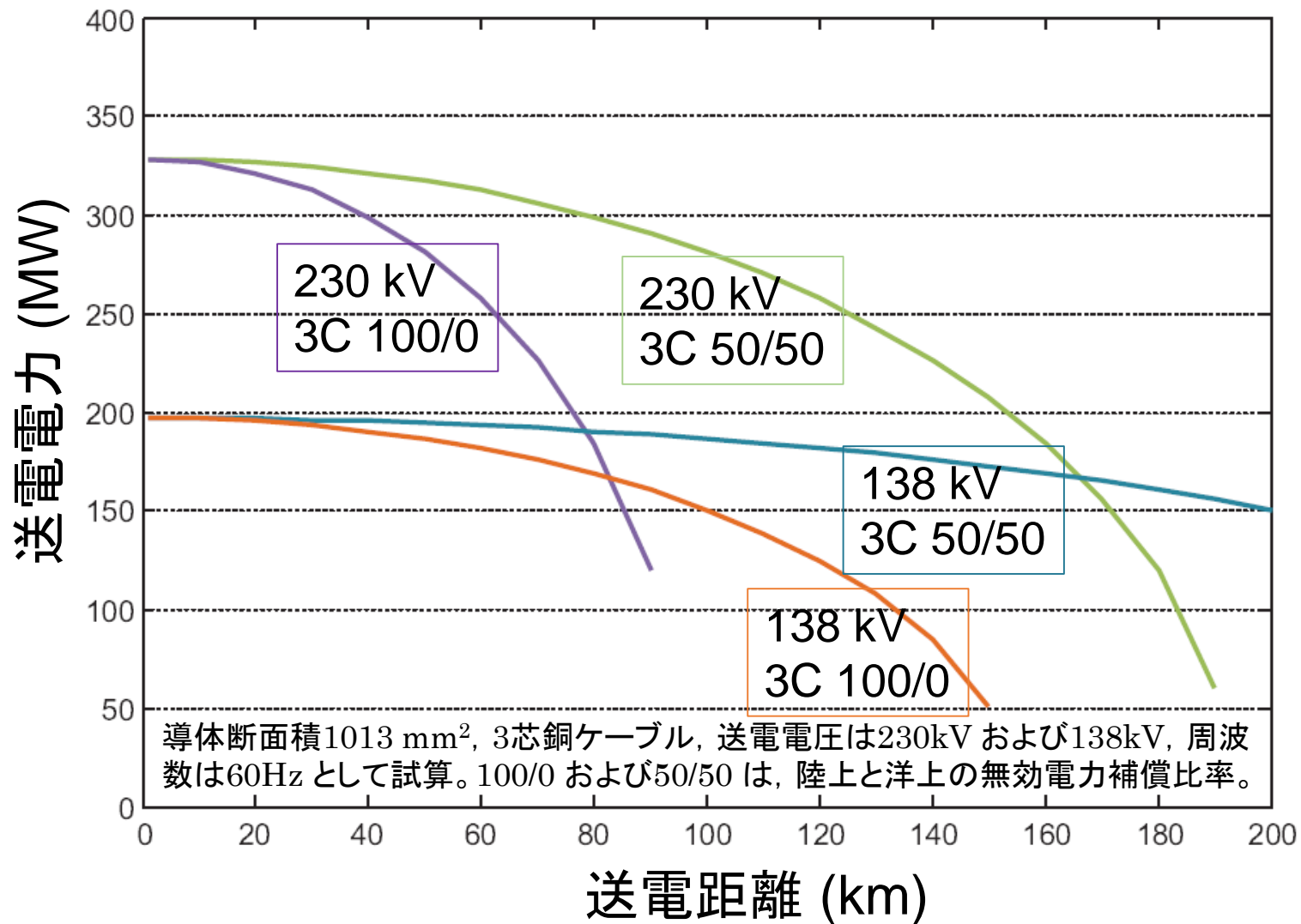
ケーブル送電における課題



- 交流による長距離大容量送電は困難
(対地静電容量に変位電流が流れ、無効電力を生じる)
- ケーブル&長距離送電では直流送電が有利



交流ケーブル送電：送電距離 vs 送電電力^[2]



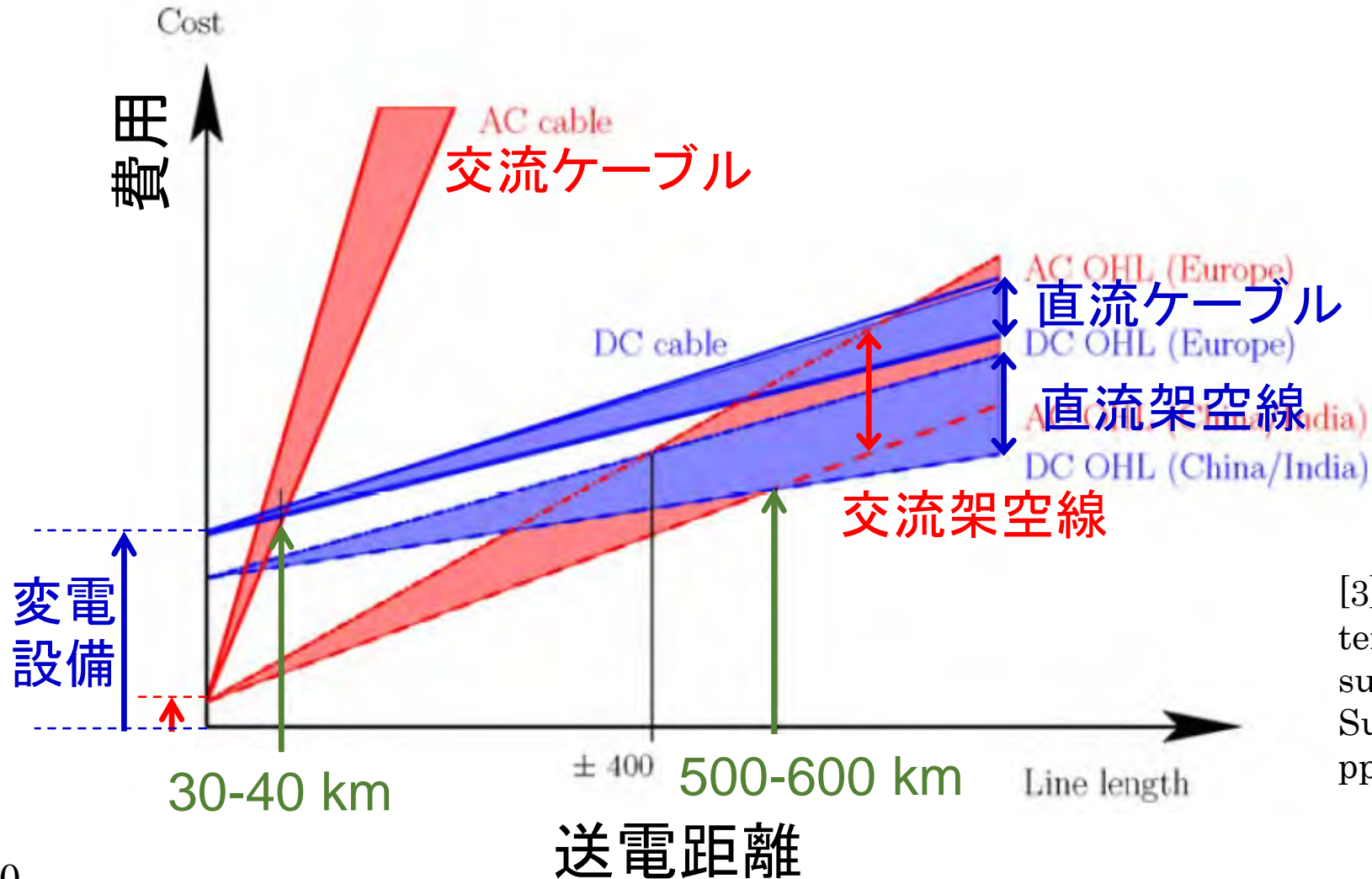
- **交流送電**では, 距離と電圧に応じて無効電力が増大し, **送電電力が低下する**

[2] J. P. Daniel, “National Offshore Wind Energy Grid Interconnection Study Final Technical Report,” U.S. Department of Energy, July, 2014.



送電距離 vs 費用

交流送電と直流送電の費用比較 [3]



- 直流の送電線は安価だが、両端に交直変換器が必要
- ケーブル送電では30-100 kmを境に費用が逆転する。

[3] D. V. Hertem, M. Ghandhari, "Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 9, pp. 3156-3163, Dec. 2010.



直流送電用の交直変換器の発展

他励式変換器による直流送電^{[4][5]}

第1世代: 水銀整流器

- スウェーデン Gotland-1 (1954～1986)
*世界初の商業運転
- 日本 佐久間FC(1965～1993)



第2世代: サイリスタ変換器

- カナダ Eel River (1972～)
*世界初の商業運転
- 日本 新信濃FC-1号(1977～)

自励式変換器による直流送電^[6]

第3世代: PWM変換器 (IGBT利用)

- スウェーデン Gotland (1999～)
*世界初の商業運転

第3.5世代: 変圧器多重変換器^[7]

- 日本 新信濃3端子BTB (1999)



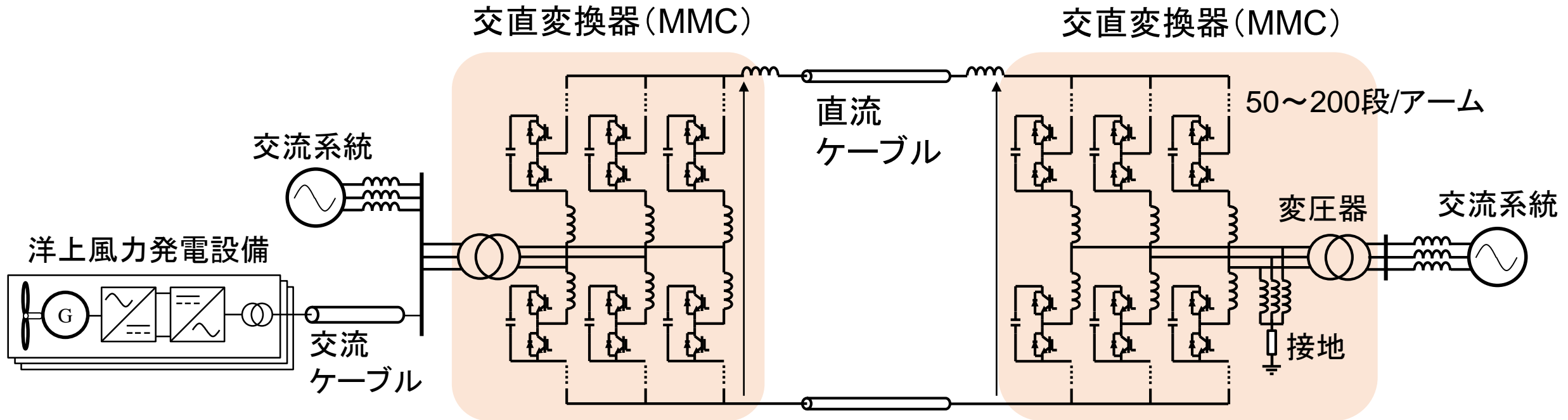
第4世代: モジュラーマルチレベル変換器 (MMC)

- 米国 Trans Bay Cable (2010～) ^[8]
*世界初の商業運転
- 日本 新北海道本州間連系 (2019～) ^[9]

70年近く利用され続け、現在も技術開発が続く、他に代え難い技術



モジュラーマルチレベル変換器(MMC)による直流送電



代表的用途

- ◆ 交流系統間 ⇒ 連系用
- ◆ 電源送電用 ⇒ 送電電力を決める
- ◆ 交流系統側 ⇒ 交流電圧を決める

送電側変換器の役割

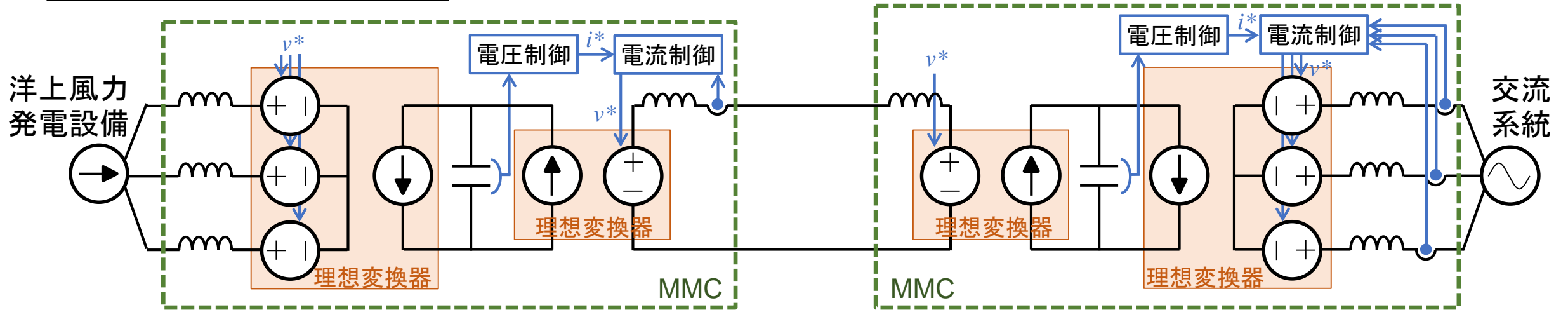
受電側変換器の役割

- ◆ 受電電力を交流系統に送る
- ◆ 交流系統側の電圧・周波数制御を補助する



MMCによる直流送電の制御（電源送電用の例）

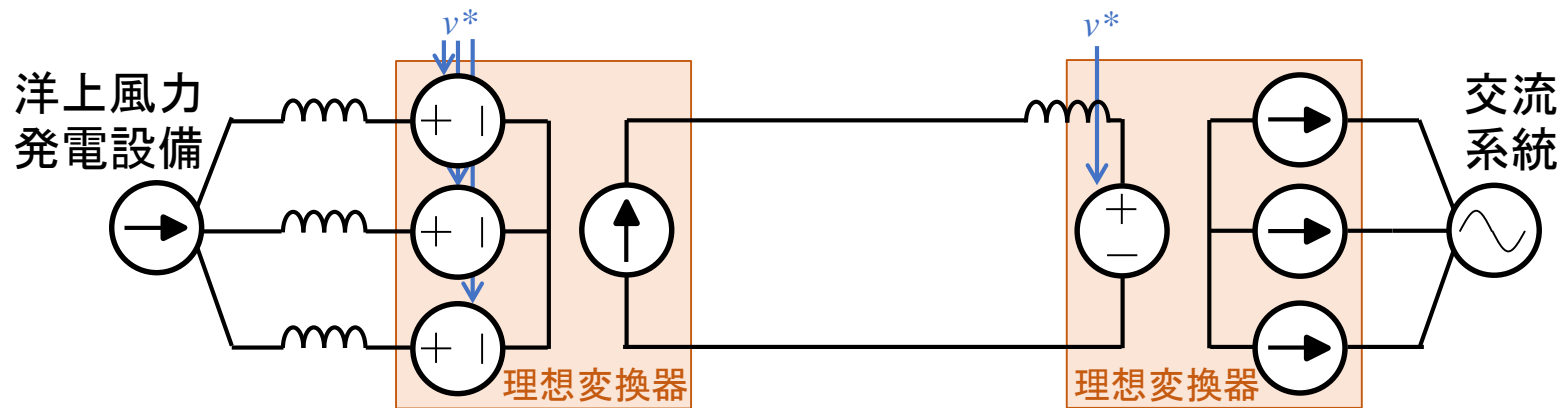
等価回路＋主な制御系



等価回路（制御系も統合）



定常状態（通常運転時）を考える場合



左の等価回路により動作を説明できる



2. 直流送電の現在 ～2地点間の送電線として～



電力自由化がもたらした送電網の広域運用^[14]

自由化と市場統合 ⇒ 広域の電力取引 ⇒ 地域間送電線の増加

日本の経過

- 2000年～ 電力自由化開始
- 2004年～ 送電網利用の公平性担保のため電力系統利用協議会(ESCJ)を組成
- 2011年 福島第一原発事故
- 2015年 電力広域的運営推進機関(OCCTO)を組成。ESCJは解散。
- 2020年 発送電分離

欧州の経過

- 1996年～ 電力自由化開始
- 2003年～ 送電網の中立化(発送電分離)推進
- 2008年 広域運用のための各送電会社間の協議機関 ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity)を組成

[14] 瀧口 信一郎:「電力システム改革のさきがけとしての広域運用機関」, JRILレビュー, vol. 9, no. 10, pp. 5-19, 2013.



再エネ導入による広域運用

再生可能エネルギーの特徴: 「**偏在**」と「**出力変動**」

- **偏在**対策: 長距離大容量の電力輸送
- **出力変動**対策: 広域での出力平準化

これらに対する様々な対策の中の1つとして
直流送電による送電網の広域運用がある



日本の直流送電・直流連系設備

北海道・東北間

- 北本連系設備 600 MW
- 新北本連系設備 300 MW
- 新々北本連系設備 300 MW (2028予定)

中部・北陸間

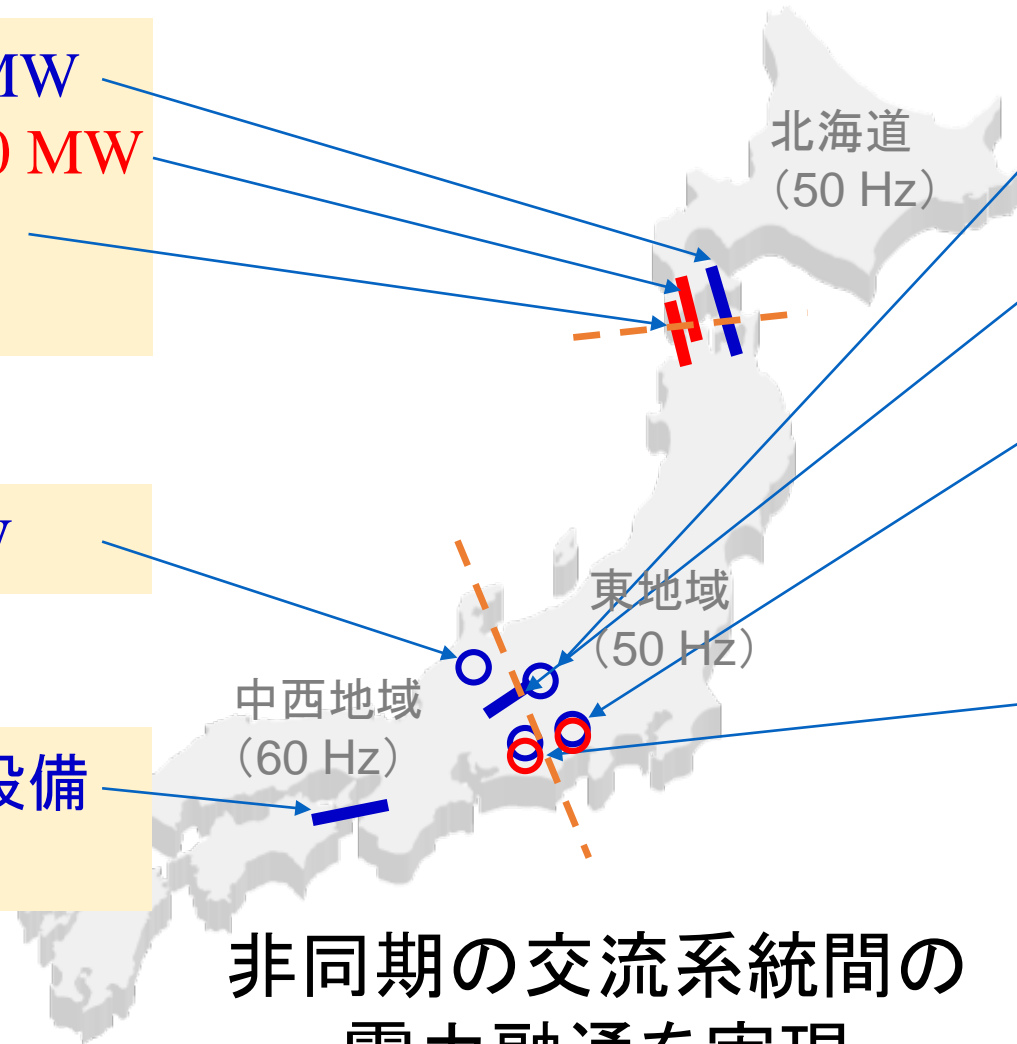
- 南福光BTB 300 MW

関西・四国間

- 紀伊水道直流連系設備 1400 MW

東京・中部間

- 新信濃変電所 600 MW
- 飛騨信濃周波数変換所 900 MW
- 東清水変電所 300 MW
- 東清水変電所 600 MW (2028予定)
- 佐久間周波数変換所 300 MW
- 新佐久間周波数変換所 300 MW (2028予定)

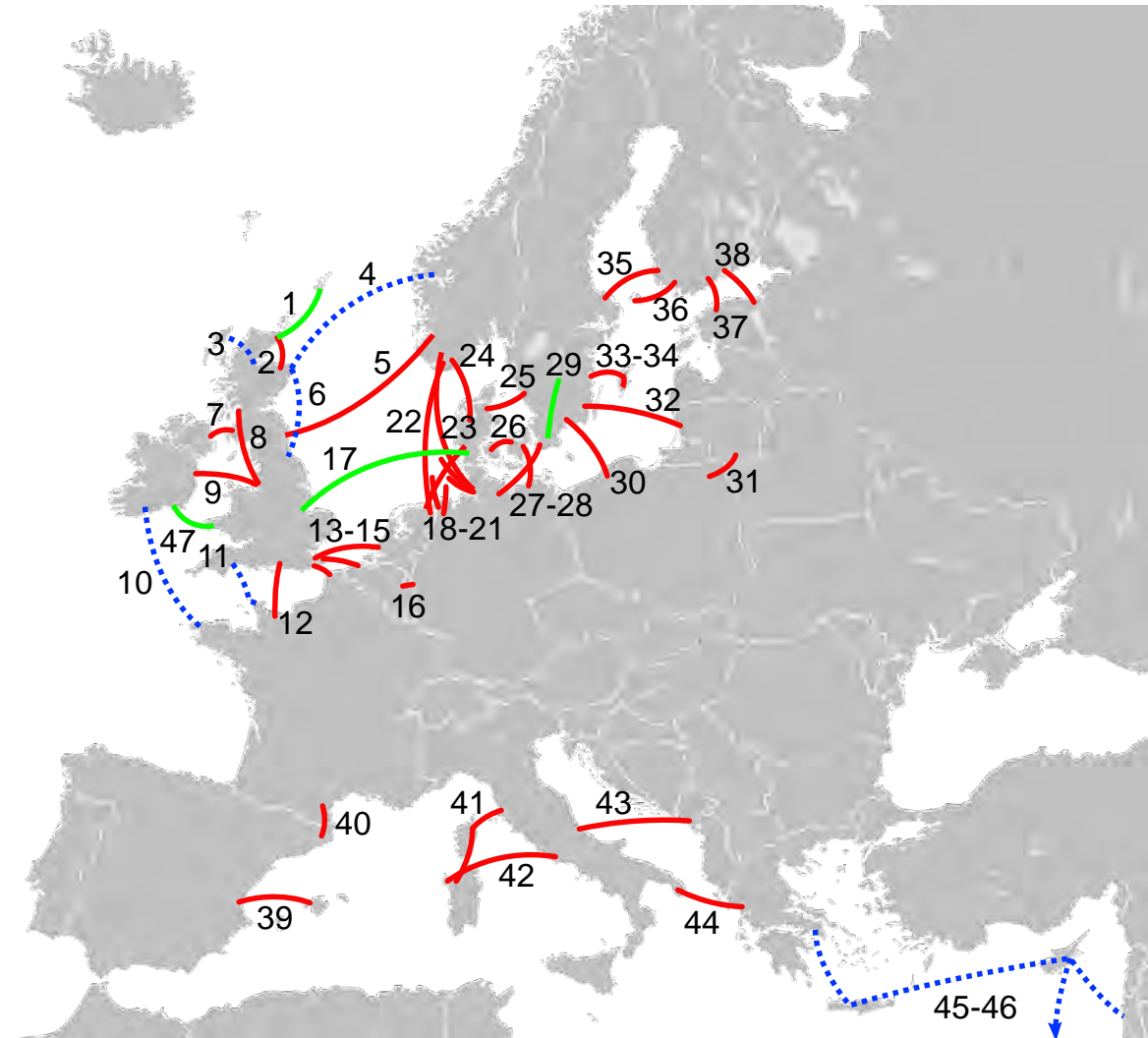


非同期の交流系統間の
電力融通を実現

- 他励式
- 自励式



欧州の直流送電による連系線 [10]



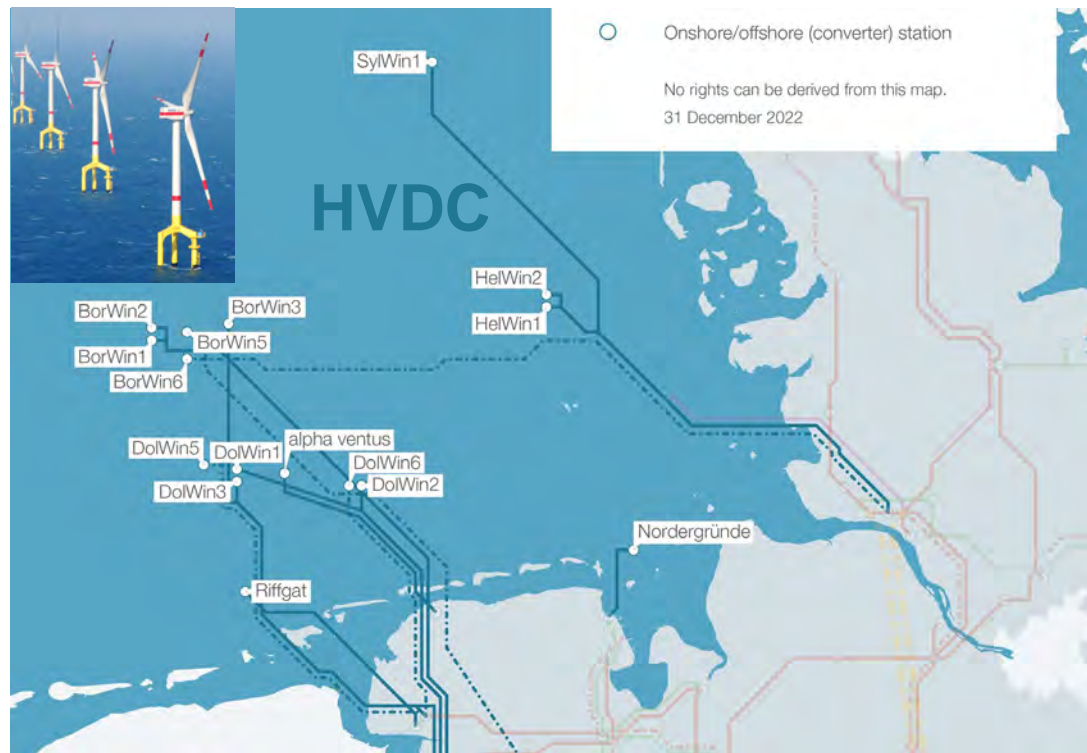
欧州には大規模な交流系統が存在するが、直流送電により海を隔てた電力融通を実現

- 運用中
 - 建設中
 - 計画中
- (2019年現在)



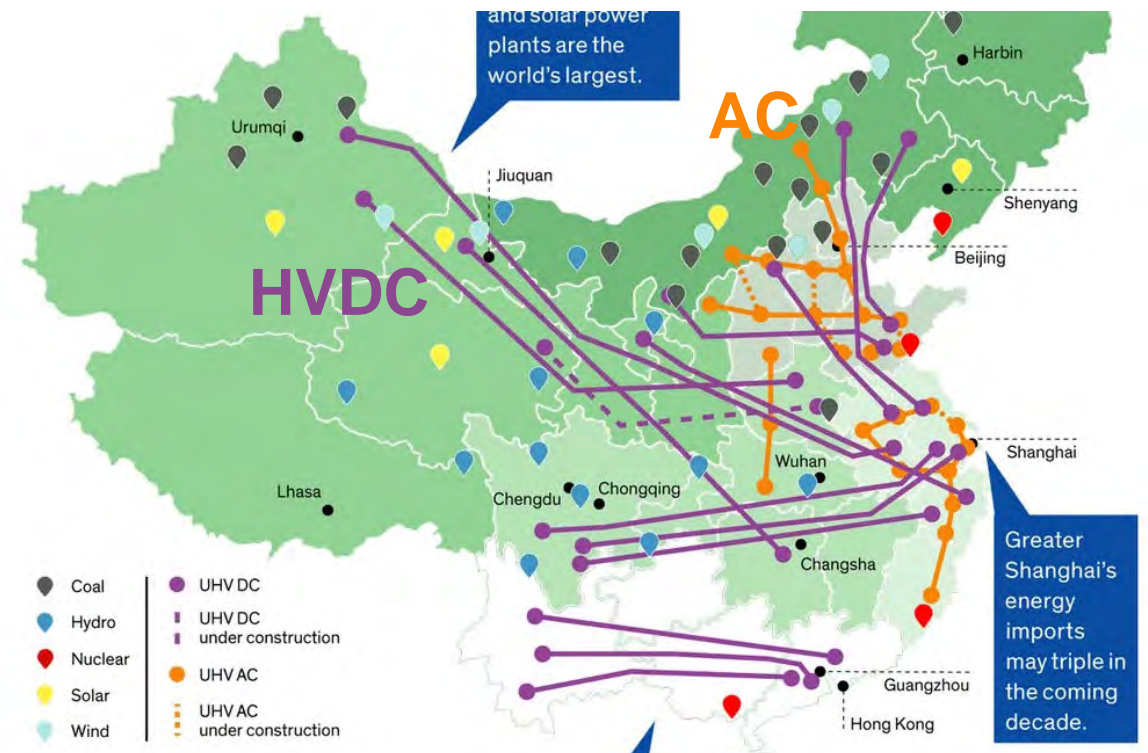
偏在する電源の長距離送電用

洋上風力用電源線・自励式(ドイツ)



[11] TenneT website, "Grid maps," Dec. 2022, <https://www.tennet.eu/grid/grid-maps>.

陸上発電用電源線・他励式(中国)



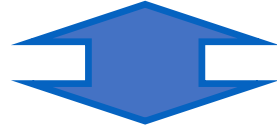
[12] P. Fairley, "China's ambitious plan to build the world's biggest supergrid," IEEE Spectrum, Feb. 2019.

2地点間を結ぶ「送電線」の並行敷設(スパゲッティ)



ネットワーク化の利点と課題

現状の直流送電は、**2地点間**を結ぶ「送電線」の並行敷設



電力・通信・ガス・鉄道・道路交通・水道とも、**ネットワーク化**を進めてきた歴史あり

利点

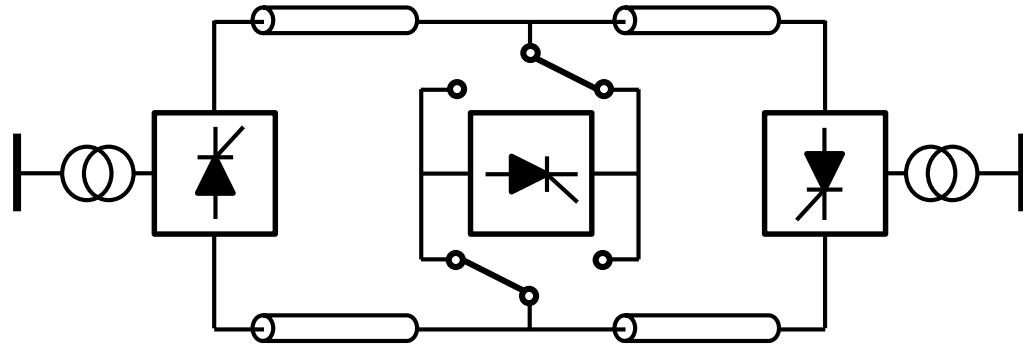
- 経路選択の柔軟性の向上
- 耐故障，供給信頼性の向上
- 送電制約による発電機会損失の低減（経済性の向上）

課題

- 設備故障の連鎖的な波及
- 設備設計や運用の複雑化
- 異機種間の相互接続性
（標準化・規格制定が必要）

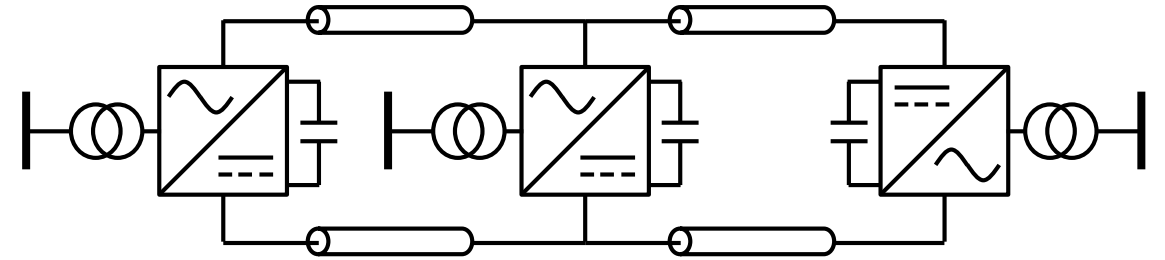


■ 他励式多端子直流送電



- 他励式変換器の電流は一方向
- 変換器をスイッチで切替えて潮流反転 (Québec–New England HVDC, SACOI interconnection など)
- 基本的には電源から需要地への一方向潮流。一部端子のみ双方向。

■ 自励式多端子直流送電



- 自励式変換器の電圧は一方向
- 電流極性を反転して潮流反転
- スイッチを用いずに、すべての端子で双方向に潮流制御可能
⇒ 潮流方向の自由度が高い利点
⇒ 普及が多端子化の機運を醸成

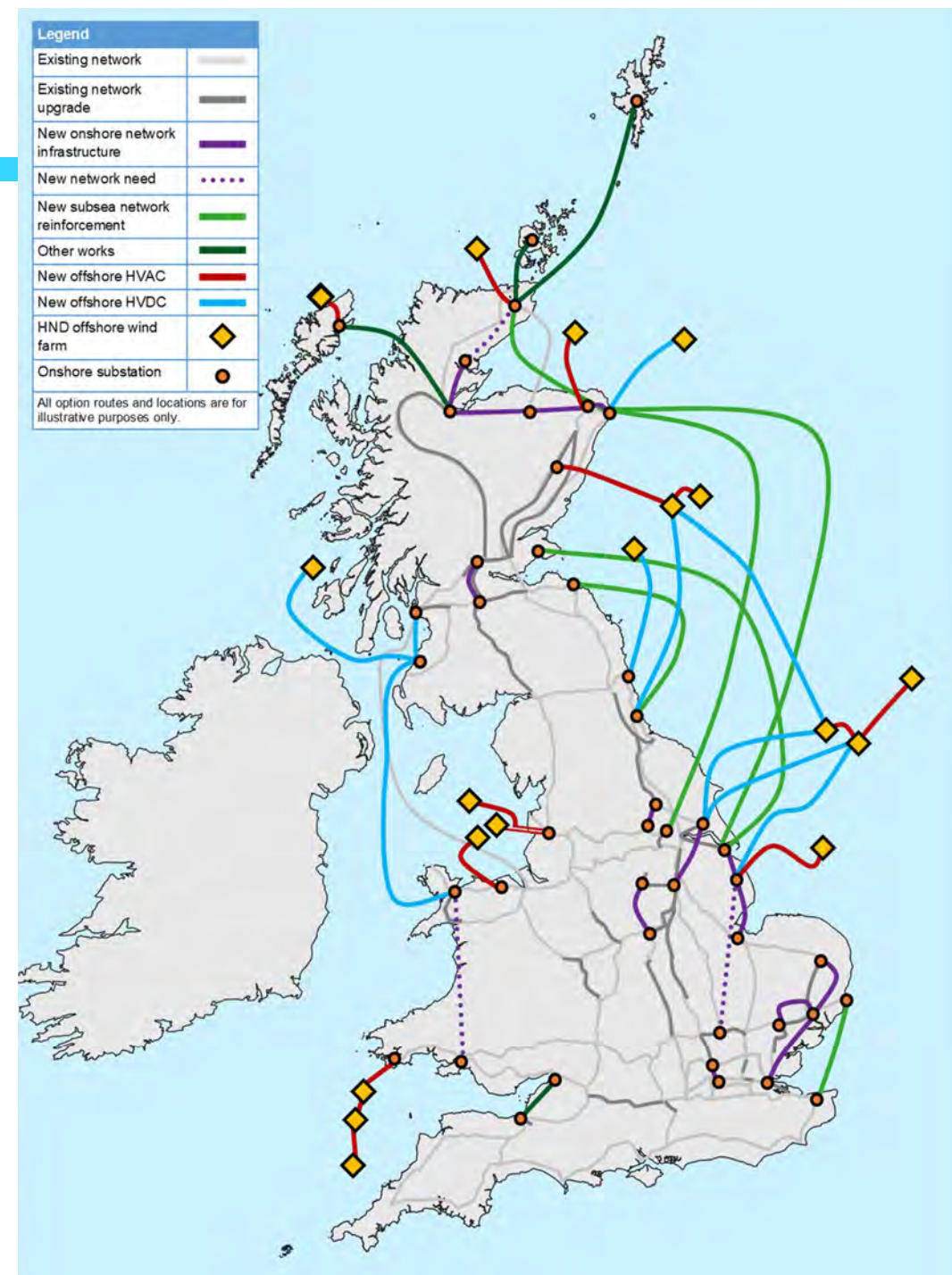


3. 直流送電の将来

～電力系統の広域運用のために～

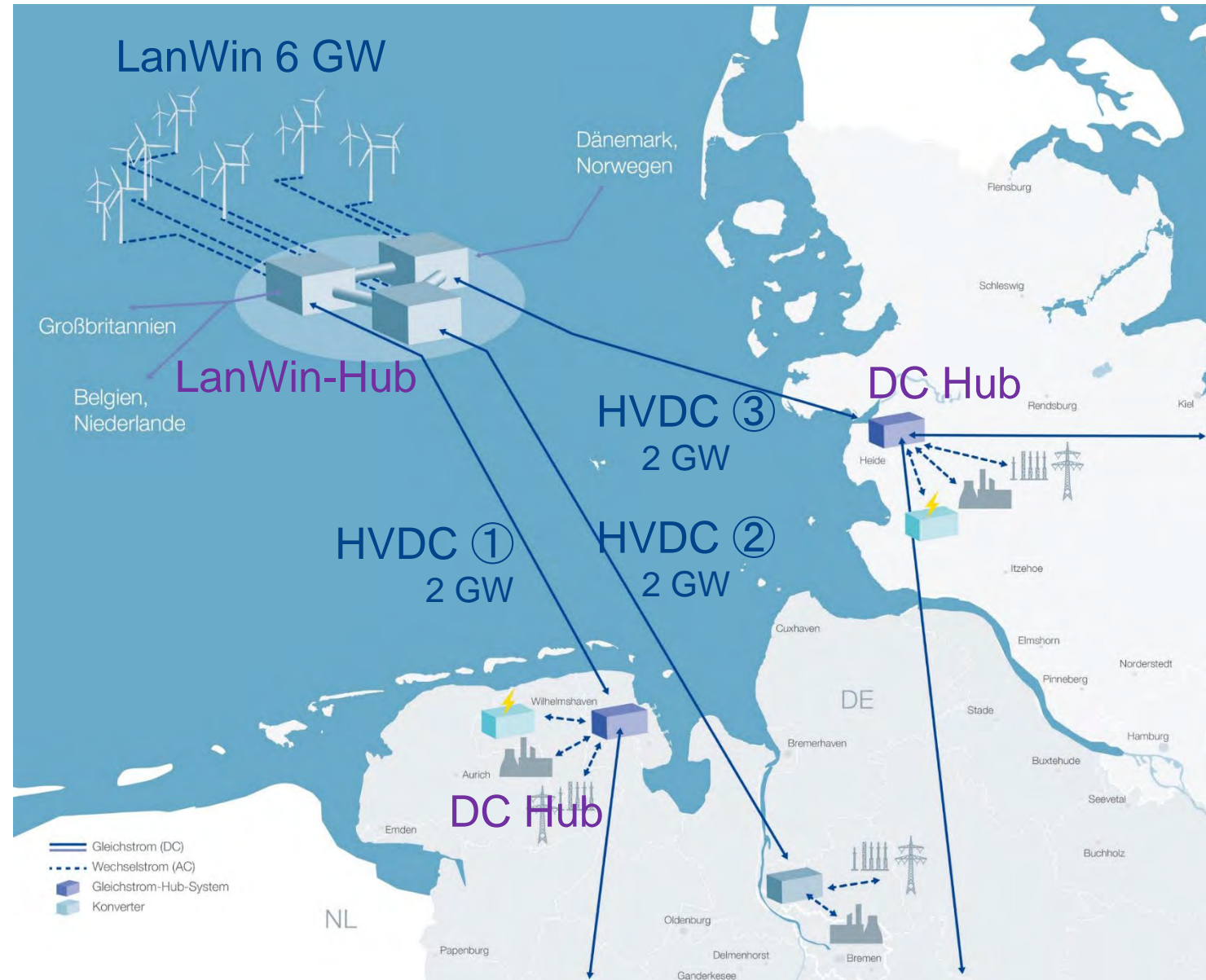


- 2030年に洋上風力 50 GW (政府目標)
- 北部の電源地帯から南部の需要地へ送電するための**海底送電線 (緑色)**
- 将来新設する23 GWの洋上風力◆を連系する**直流 (青色)・交流 (赤色)**送電線
- 海底送電線の資本コスト76億ポンドに対し、系統制約コストを131億ポンド削減
- 協調接続により、従来の放射状接続から55億ポンドのコストを削減可能

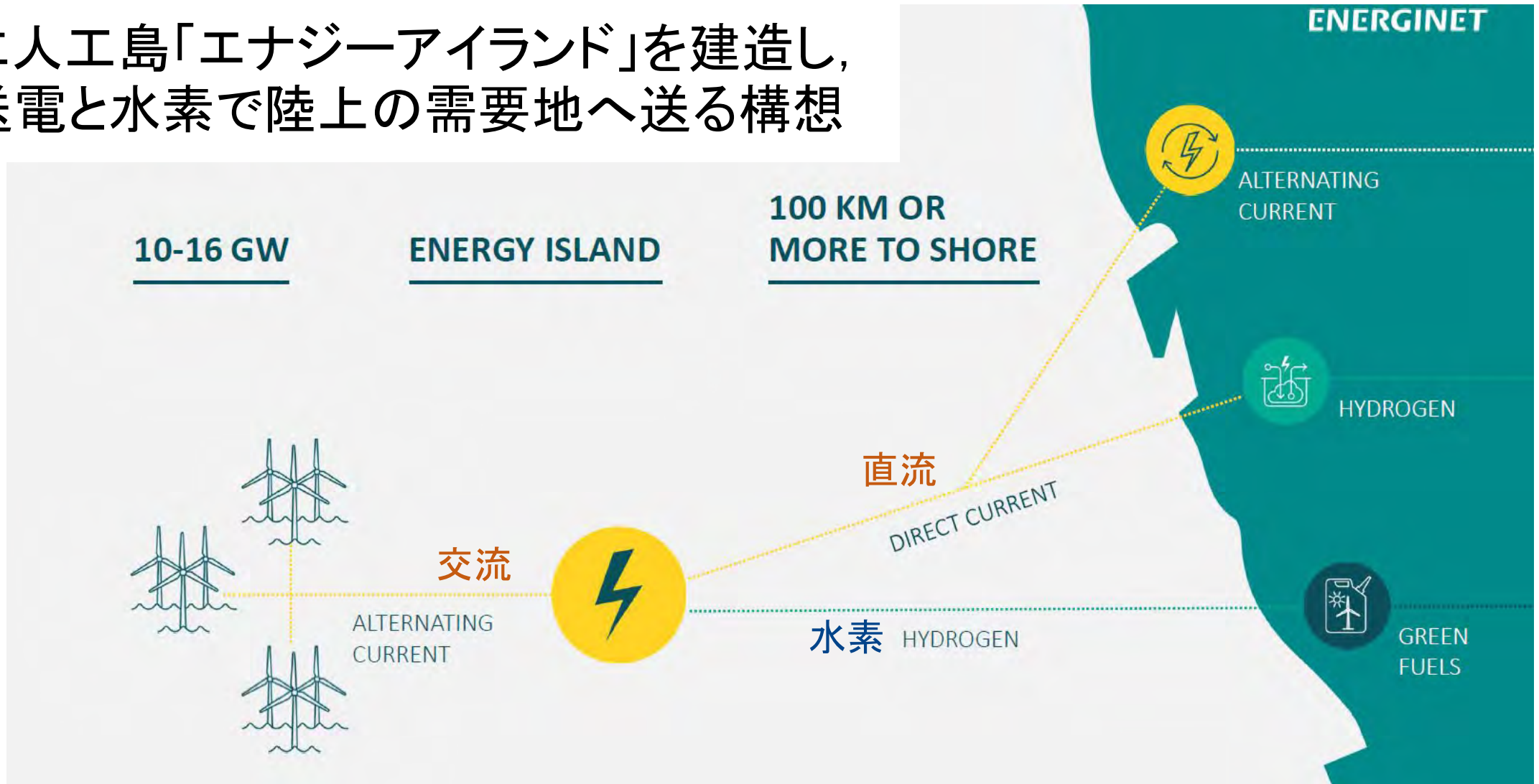


- 洋上風力 6 GWの連系
- 3式の2端子直流送電(各2 GW)と **LanWin-Hub**(直流の開閉所)の併用により供給セキュリティ強化(2032年完成)
- 将来の国際的なネットワーク化を見据えた設備設計

[16] Tennet ウェブサイト, “Windstrom-Booster-Konzept,” 2021年10月発表



- 北海に人工島「エナジーアイランド」を建造し、直流送電と水素で陸上の需要地へ送る構想

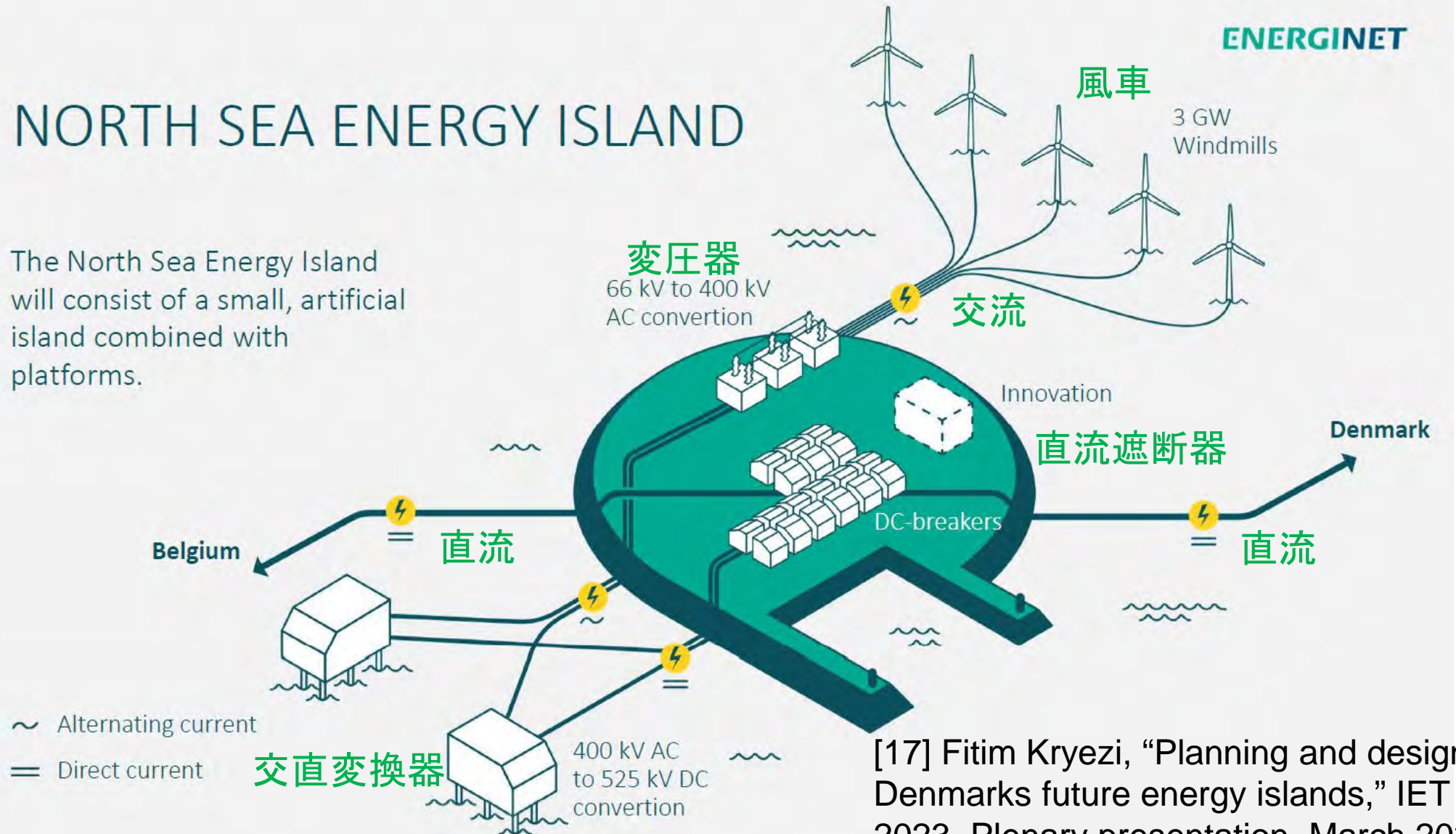


[17] Fitim Kryezi, “Planning and design of Denmark’s future energy islands,” IET ACDC 2023, Plenary presentation, March 2023.



NORTH SEA ENERGY ISLAND

The North Sea Energy Island will consist of a small, artificial island combined with platforms.



[17] Fitim Kryezi, "Planning and design of Denmark's future energy islands," IET ACDC 2023, Plenary presentation, March 2023.

North Sea Wind Power Hub

ENERGINET

デンマークTSO (電力, ガス)

gasunie

オランダ・ドイツTSO (ガス)

Tennet

オランダ・ドイツTSO (電力)

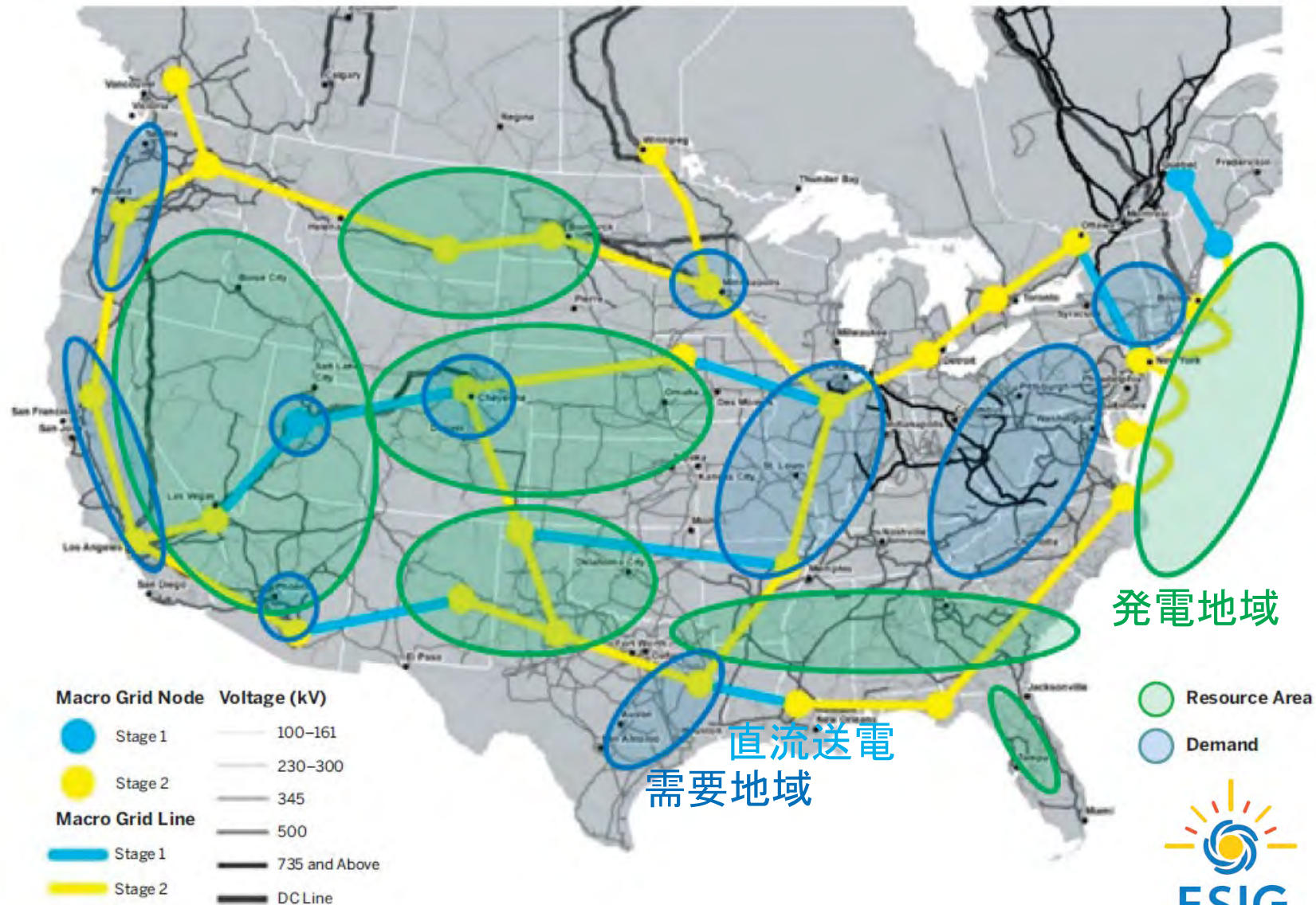
- オランダ・ベルギー・デンマーク・ドイツは、北海において2030年までに65 GW、2050年までに150 GWの洋上風力建設に合意 (Esbjerg宣言, 2022年)
- ハブ & スポーク構成の直流送電と水素パイプラインを用いた輸送
- 水素利用の目的は、産業・運輸の需要増への対応、電力系統の負担軽減、設備利用率向上

[18] North Sea Wind Power Hub Programme, “Hubs and spokes – viable beyond theory,” Nov. 2022.



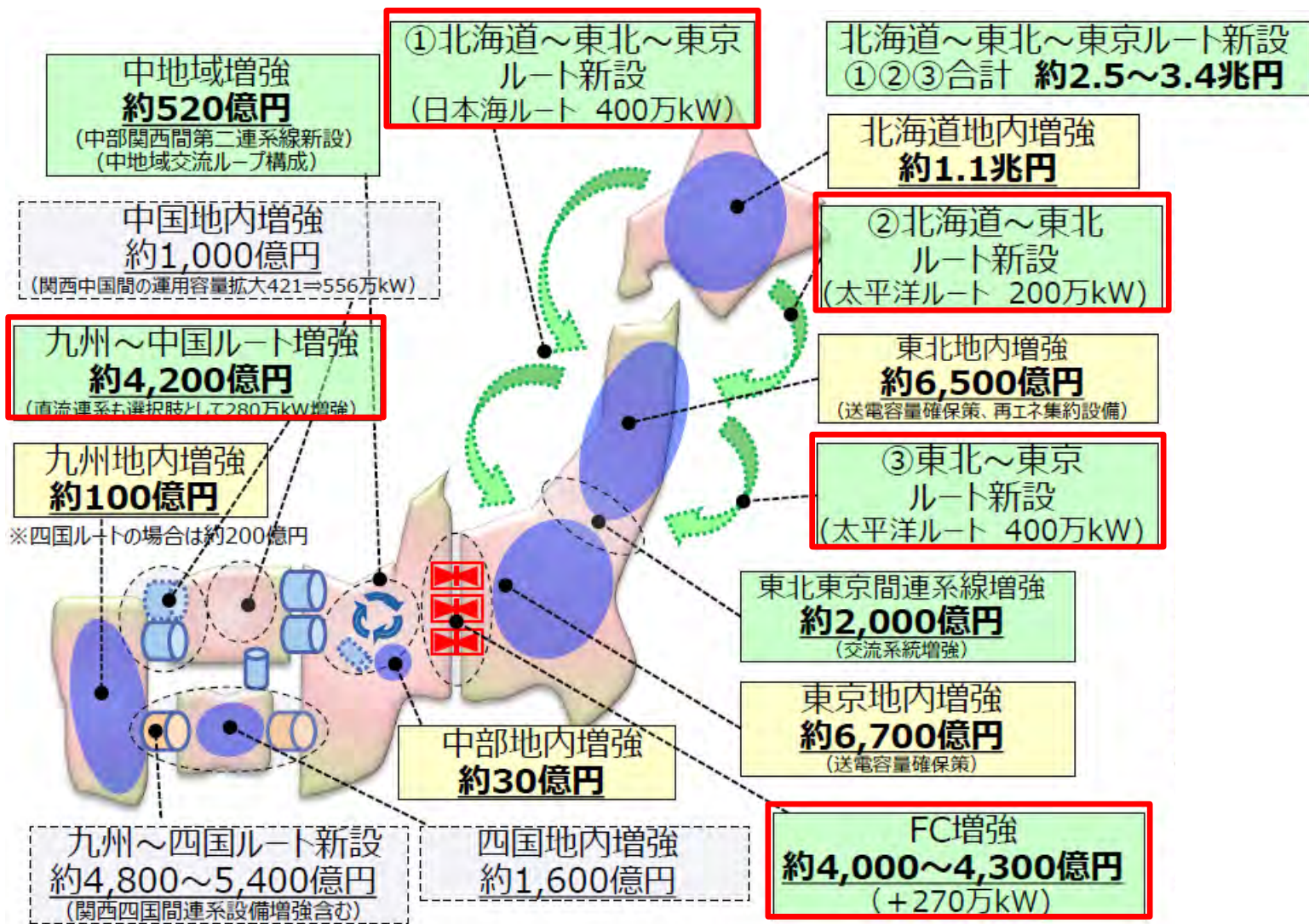
アメリカ U.S. Macrogrid

- 既存の交流系統間を相互接続するための多端子HVDCシステム
- 発電地域と需要地域間の送電手段
- 再エネ大量導入時の信頼度向上に寄与
- 送電線の投資は発電と蓄電のコストを低減させ、経済性が成立



- 2050年カーボンニュートラル実現を見据えた「**広域連系系統のマスタープラン**」
- 増強にかかる費用と増強による便益を比較し、費用対効果が見込まれる増強方策・容量を整理
- 直流連系量総和 **15.5 GW**

[20] 電力広域的運営推進機関:「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」, 2023年3月



なぜ、いま直流送電が注目されるのか？

- 社会的背景
 - 電力取引の自由化
 - 再生可能エネルギー電源への移行
 - 上記を進める制約要因が送電設備の不足
- 広域での電力融通を可能とすることで、社会全体の便益を高めるという報告あり
- 長距離大容量の電力輸送の場合、交流送電よりも直流送電が安価になり得る

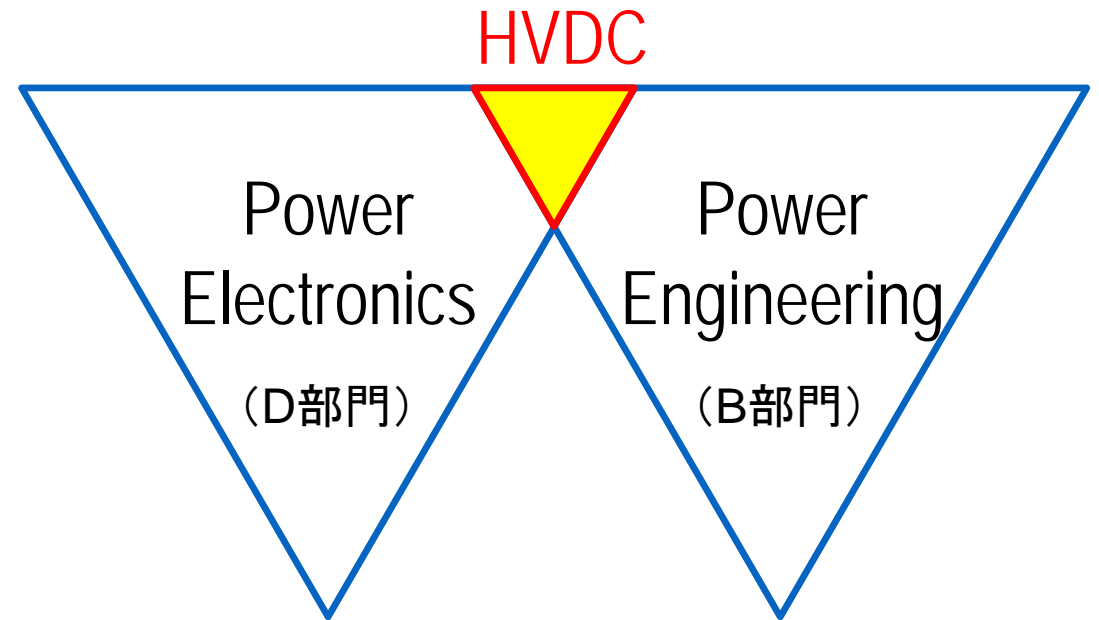


4. 直流送電に関する学問分野



さまよえる直流送電の専門家たち？

- 直流送電は、パワーエレクトロニクス(D部門)と、電力工学(B部門)の境界にあるニッチな分野？教科書もほぼない状況。
- 半世紀前に“Limbo (辺獄)”をさまようパワーエレクトロニクス [20, 21]と類似する
- このままニッチな分野であり続けるのか？ 今後発展するのか？



[21] W. E. Newell, "Power Electronics - Emerging from Limbo," IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 6-12, June 1973.

[22] 平地克也, "パワーエレクトロニクスの最も有名な論文の紹介," ([19]の解説), 2008-8.



A discipline - Emerging from Limbo

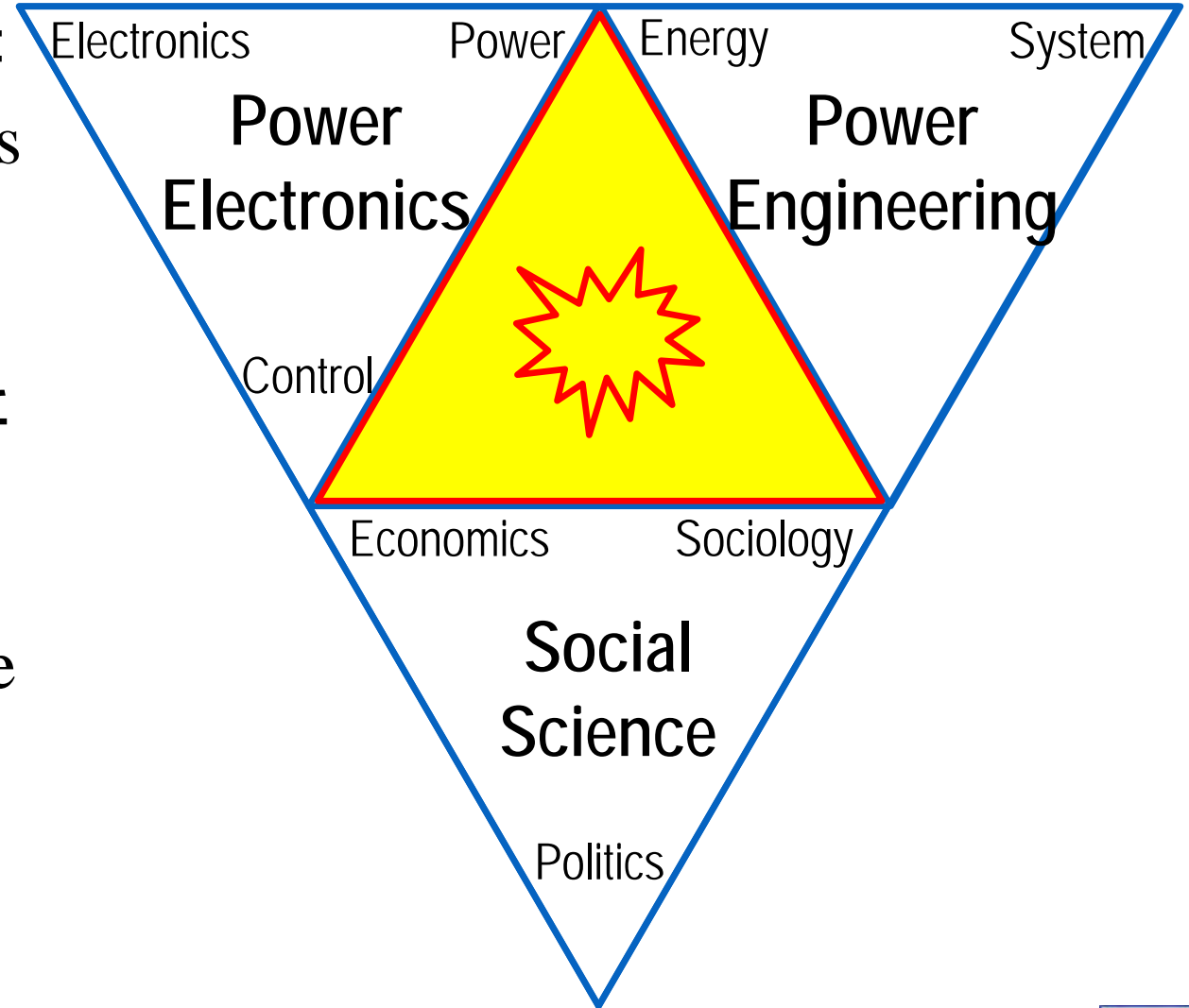
Dr. Newell の50年前の言葉を借りて:

“There is an intense need for specialists in ~~area~~ to band together to overcome the challenges facing us.”

専門家達は直面する課題の克服のために一致団結する必要がある

“~~area~~ will in fact emerge as a full-fledged discipline and profession of the future.”

当分野は実際に、将来の立派な学問分野および専門職として現れるだろう



あとがき

- 交流の電力系統が140年かけて構築されたように、今後100年かけて進展する転換点に、我々は今立っているのかもしれない。
- この転換期には、新たな専門家・分野が必要となる。この転換の成否は、今ここに集う我々の行動による。
- 産学合同セミナーを契機として、分野・組織の枠を超えて皆で協力し、産みの苦しみを乗り越えていこう！



文献 (1/2)

- [1] Wikipedia: 「電流戦争」, <https://ja.wikipedia.org/wiki/電流戦争>, 2023-3閲覧.
- [2] J. P. Daniel, S. Liu, E. Ibanez, K. Pennock, G. Reed, S. Hanes, “National Offshore Wind Energy Grid Interconnection Study Final Technical Report,” U.S. Department of Energy No. EE-0005365, July, 2014.
<http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/NOWEGIS%20Full%20Report.pdf>, p.114.
- [3] D. V. Hertem, M. Ghandhari, “Multi-terminal VSC HVDC for the European supergrid: Obstacles,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, no. 9, pp. 3156-3163, Dec. 2010.
- [4] 町田武彦編:「直流送電工学」, 東京電機大学出版局, 1999.
- [5] 林 敏之:「電力分野におけるパワーエレクトロニクス」, 電気學會雑誌, vol. 113, no. 10, pp. 844-848, 1993.
- [6] F. Wang, L Bertling, T Le, “An Overview Introduction of VSC-HVDC: State-of-art and Potential Applications in Electric Power Systems,” Cigre Bologna Symposium, 2011.
- [7] 三菱電機:「Shin-Shinano VSC BTB」, <https://psg.mitsubishielectric.co.uk/products/hvdc-facts/hvdc-%20solutions/shin-%20shinano-vsc/>, 2023-3閲覧.
- [8] T.Westerweller, K.Friedrich, U.Armonies, A.Orini, D.Parquet, and S.Wehn, “Trans Bay cable – world's first HVDC system using multilevel voltage-sourced converter,” CIGRE session, Paris, B4-101, 2010-8.
- [9] S. Sato, T. Uchiumi, A. Miura, T. Murao, K. Suzuki, “The Construction of the New Hokkaido-Honshu HVDC Link Project,” CIGRE session, Paris, B4-132, 2018-8.
- [10] Wikipedia “List of HVDC projects” https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_HVDC_projects, 2023-4閲覧.
- [11] TenneT website, “Grid maps,” <https://www.tennet.eu/grid/grid-maps>, 2023-3閲覧.



文献 (2/2)

- [12] P. Fairley, “China's Ambitious Plan to Build the World's Biggest Supergrid,” IEEE Spectrum, 21 Feb. 2019. <https://spectrum.ieee.org/chinas-ambitious-plan-to-build-the-worlds-biggest-supergrid>, 2023-3閲覧.
- [13] 多端子連系をはじめとする直流送電の最新技術動向調査専門委員会編:「多端子連系をはじめとする直流送電の最新技術動向」, 電気学会技術報告, no. 1538, 2022-10.
- [14] 瀧口 信一郎「電力システム改革のさきがけとしての広域運用機関」, JRIレビュー, vol. 9, no. 10, pp. 5-19, 2013. <https://www.jri.co.jp/MediaLibrary/file/report/jrireview/pdf/7037.pdf>
- [15] National Grid ESO, “Holistic Network Design,” July 2022, <https://www.nationalgrideso.com/document/262681/download>
- [16] Tennet ウェブサイト, “Windstrom-Booster-Konzept,” 2021年10月発表 <https://www.tennet.eu/de/ueber-uns/innovationen-und-partnerschaften/windstrom-booster-konzept>
- [17] F. Kryezi, “Planning and design of Denmark's future energy islands,” IET ACDC 2023, Plenary presentation, Mar. 2023.
- [18] North Sea Wind Power Hub Programme, “Hubs and spokes – viable beyond theory,” Nov. 2022. <https://northseawindpowerhub.eu/knowledge/hubs-and-spokes-viable-beyond-theory>
- [19] Energy Systems Integration Group, “Design Study Requirements for a U.S. Macrogrid,” Feb. 2022.
- [20] 電力広域的運営推進機関:「広域系統長期方針(広域連系系統のマスタープラン)」, 2023年3月
- [21] W. E. Newell, “Power Electronics - Emerging from Limbo,” IEEE Power Electronics Specialists Conference, Pasadena, CA, USA, pp. 6-12, June 1973. <https://doi.org/10.1109/PESC.1973.7065162>
- [22] 平地克也, “パワーエレクトロニクスの最も有名な論文の紹介,” ([19]の解説), 2008-8, <http://hirachi.cocolog-nifty.com/kh/files/20080818-1.pdf>

