アジア国際送電網研究会
第２次報告書が明らかにしたもの

―日韓・日露の国際送電網の意義と実現可能性―

2018年7月23日

都留文科大学　高橋　洋

アジア国際送電網研究会の概要

「アジア国際送電網研究会」（事務局 自然エネルギー財団）

2016年7月設置　研究会開催13回、2017年1–2月 欧州調査実施

2017年4月 中間報告書発表

2017年9月 北米調査実施

アジア国際送電網研究会　委員名簿

大山 力	横浜国立大学 大学院工学研究院 教授	（座長）
高橋 洋	都留文科大学 地域社会学科 教授	（座長代理）
橘川武郎	東京理科大学大学院経営学研究科 教授	
斉藤 哲夫	東京大学 生産技術研究所 特任研究員	
新岡 卓	欧州ビジネス協会 エネルギー委員会 委員長	
三輪 茂基	ソフトバンクグループ株式会社 CEOプロジェクト室 室長 SBエナジー株式会社 代表取締役社長	
大野 輝之	公益財団法人 自然エネルギー財団 常務理事	
岡本 浩	東京電力パワーグリッド株式会社　取締役副社長	（オブザーバー）
田中 伸男	公益財団法人 笹川平和財団 会長	（顧問）

第２次報告書　目次

第1章：最近の国際送電網と電力システム改革を巡る状況
北東アジアにおける国際送電網への取り組み
国内の電力システム改革を巡る状況
国内の広域運用と系統接続問題

第2章：北米における国際送電網への取り組み
北米の電力システムと国際送電網
北米の国際連系線の事例

第3章：日露・日韓の国際連系線の建設ルートと建設費用
国際連系線の建設ルート
建設費の試算

第4章：国際連系線のビジネスモデル・便益と法的枠組み
投資回収のためのビジネスモデルと試算結果
国際連系の便益の評価
国際連系のための法的枠組み

第　3　章

日露・日韓の建設ルートと建設費用

1. 国際連系線の建設ルートの設定

表2：日露連系のシナリオ　　※日露・日韓ともに直流2GWの連系を想定

	電源	需要地
ロシア側	・アムール川流域既存水力 ・サハリン島南部新設風力	・サハリン島部 ・極東大陸部
日本側	・北海道の新設風力	・関東エリア

表3：日韓連系のシナリオ

	電源	需要地
韓国側	・韓国の新設自然エネルギー ・将来的にモンゴル・中国からの自然エネルギーも想定	・主に韓国南部および韓国首都
日本側	・九州の太陽光	・関西エリア

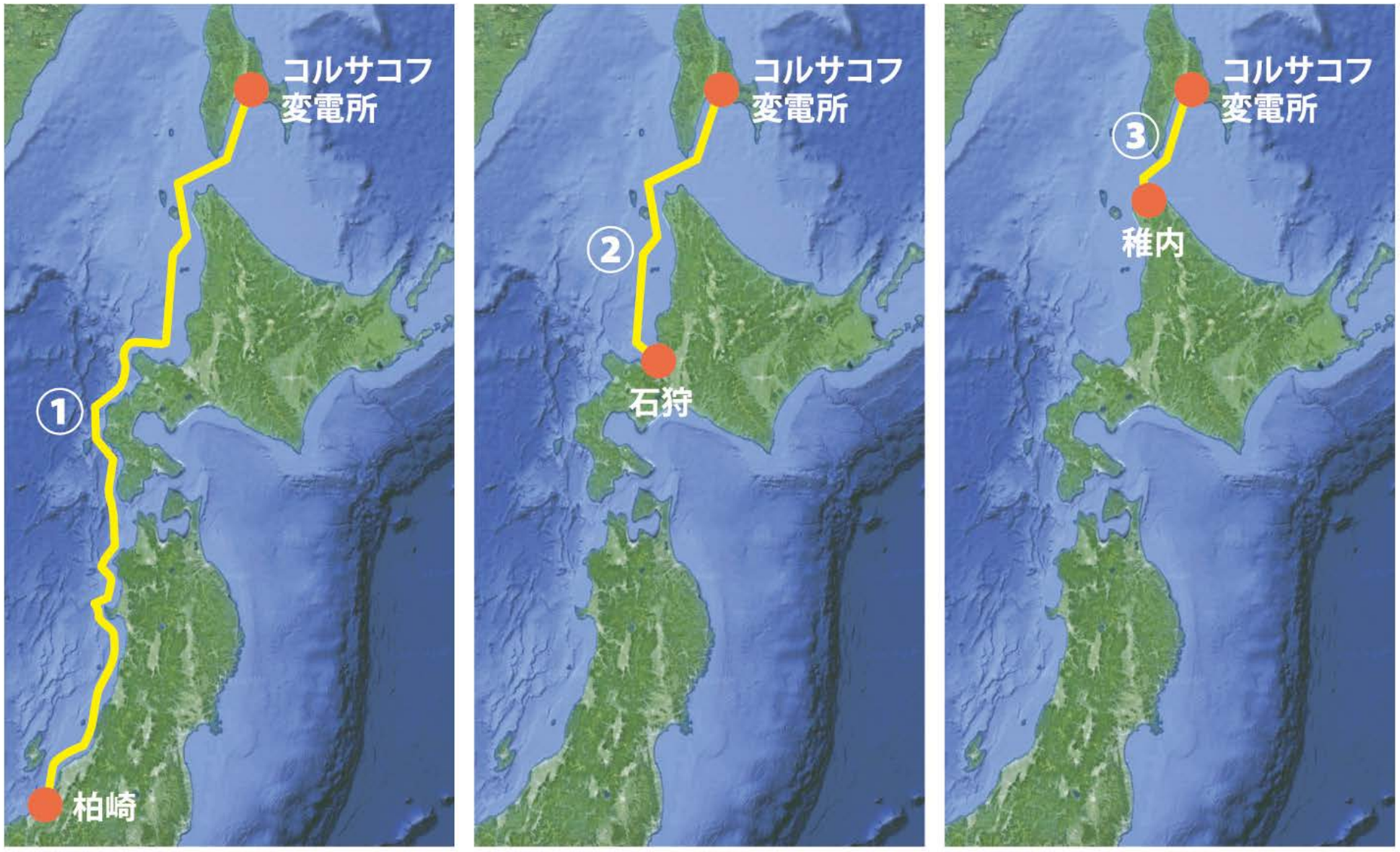
表4：机上調査における参照データ一覧

調査項目	海底ルート検討	接続地点・陸揚げ地評価
漁業権・保護区域等	海洋台帳	海洋台帳 NEDO洋上風況マップ
地質	産業技術総合研究所 「地質図Navi」、他	産業技術総合研究所「地質図Navi」、他
水深	日本海洋データセンター、他	-
土地利用状況	-	航空写真など
日本国内の送電容量	-	各電力会社系統マップ

出所:自然エネルギー財団作成

日露連系ルートの設計

・水深400mを超えないルート（欧州の先例NorNed最大水深410m）
・沿岸の漁業権エリアをできる限り迂回し、海底地形図で確認できた岩場を避ける



＜ロシアー本州＞
①サハリンー柏崎
1,255km/最大水深300m
＜ロシアー北海道＞
②サハリンー石狩
455km/最大水深300m
③サハリンー稚内
161km/最大水深100m以下

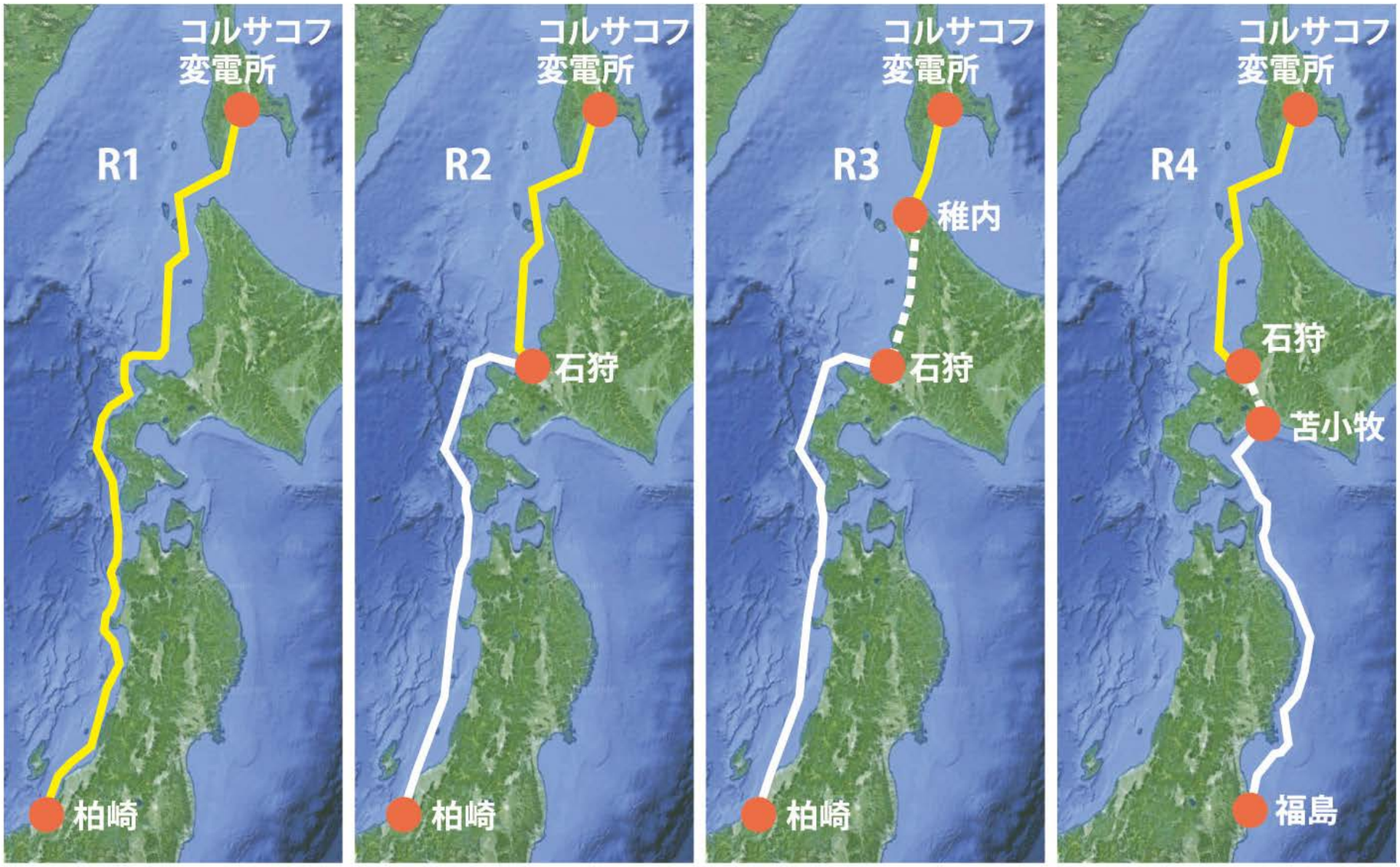
出所:自然エネルギー財団作成

日露連系ルートの設計

ロシアから本州の需要地につなぐルートの全体像

・日露連系について、北海道接続後に関東エリアへつなぐため、4つのルートを選定

・R2、R3、R4では北海道に陸揚げ、交直変換機を設置、道内の風力発電を受電



R1 サハリン一柏崎

1,255km

R2 サハリン一石狩一柏崎

1,255km

R3 サハリン一稚内一石狩一柏崎

1,258km (161+297+800km)

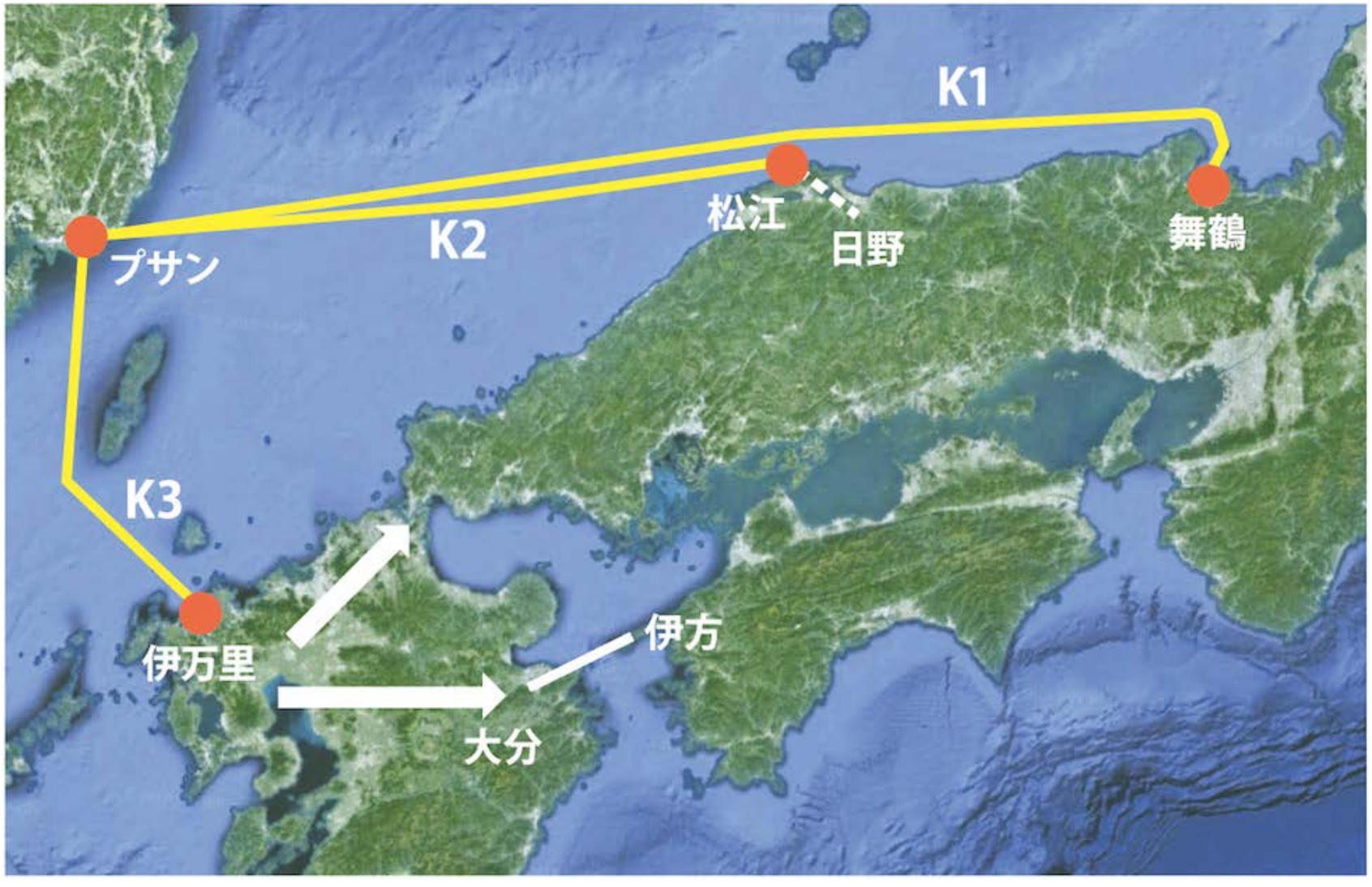
R4 サハリン一石狩一苫小牧一福島

1,246km (455+108+683km)

出所:自然エネルギー財団作成

日韓連系ルートの設計

・日韓連系について、九州接続後に関西エリアへつなぐためのルートを検討。
・以下K1からＫ３までの3つのルートを選定。
・K3では九州に接続後、１GW分を中国エリアを通じて関西エリアへ、
　＋１GW分を四国エリアを通じて関西エリアへ送る。九州－四国間の連系線新設が必要。



K1 プサン－舞鶴
　627km
K2 プサン－松江（→関西）
　372km
　＋松江～日野間 41km増強
K3 プサン－伊万里（→関西）
（中国・四国エリア経由）
　226km
　＋大分～伊方間70km新設

出所:自然エネルギー財団作成

2. 建設費の試算

自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

表7：建設費単価等の検討

項目	条件/参照元	理由
主回路構成	双極1回線、導体帰路方式	・現状１条２GWの大容量送電線は製造されていないため、そしてケーブル障害時の耐性を保つため、1GWの本線を2条使用する双極を想定。 ・帰路は、欧州では大地を利用した方式が一般的であるが、日本の既存設備(北本連系線・阿南紀北直流幹線)に倣い、導体を使用した方式。
海底線	欧州コストデータ、MIケーブル	・日本での直流海底線の実績が少ないため、先行して長距離直流海底線が既に多く敷設されている欧州で比較的最近のコストデータを参照。 ・ケーブル種類は、欧州等の長距離海底線で一般的に使用されているMI(Mass Impregnated)ケーブル。 ・帰線を本線としても使用できる可能性を持たせるため、ケーブルは同一仕様3条とし、2条の場合の1.5倍の単価。
交直変換機	ENTSO-E	・各エリア内の送電は交流で行われる為、国際連系の両端等に交直変換機が必要になる ・ENTSO-Eの2011年のデータを参照した。交直変換機の種類は、近年一般的に採用されているVSC(電圧源コンバーター)の使用を想定。VSCは従来使われてきたCSC(電流源コンバーター)と比較して、自励式でシステム全体を簡略化しやすい。 ・主回路構成を双極としているため、1箇所あたり1GWを2台設置し、送電容量2GWを満たす構成とする。
架空線	トーマツ	・トーマツの資料「送電線工事費用と期間に関する考察」（2012）内の架空線建設コストデータを参照。 ・同資料中の±250kV直流架空線の単価をもとに、±500kV直流架空線の単価を、鉄塔の費用が増額になると仮定して算出。
地中線	広域機関	・広域機関の「送変電設備の標準的な単価の公表について」（2016年3月29日）から、土木工事を含む地中線単価を参照。 ・AC33kVから275kVのデータを元に、DC±500kVの工事費単価を算出した。

出所:自然エネルギー財団作成

建設費単価

以上の検討による結果をまとめる。海底線の単価は架空線の半分以下、地中線の3分の1以下であり、最も安価である。近年欧州で長距離直流海底線が盛んに敷設されて価格競争が起こっていることも一因であろう。また、国内の架空線の単価は欧米の2倍以上であり 、日本固有の事情が働いていると考えられる。

表8：建設費単価等の検討結果

項目	単価	参照元	備考
海底線	2.93億円/km	欧州における直流海底送電線プロジェクト (SAPEI, MON.ITA, NordLink, North Sea Link)	DC±500kV、送電容量2GW、MIケーブル、3条、各ケーブル個別埋設
交直変換機	157億円/台	ENTSO-E 2011	VSC 1,250MW 500kV下限値
架空線	6.64億円/km	トーマツ送電線工事費データ(2012)	DC 500kVの単価を推計
地中線	9.15億円/km	広域機関・標準的単価(2016年3月29日)	DC 500kVの単価を推計

出所:自然エネルギー財団作成

建設費の試算：まとめ

送電容量2GWの国際連系線の建設費は、国内増強部分も含めて日露ルートで4,305億円から5,730億円、日韓ルートで2,024億円から2,465億円となる。日露ルートでは、海底送電線を長距離敷設して需要地に近い地点に接続するルートの方が、建設費は安価だが、北海道で陸揚げして各地の自然エネルギー電源と接続した場合には、その後の国内ルートを地域間連系線として活用するなど複合的便益も期待できる。

表9：日露連系建設費の全体像（国内ルート含）

ルート	条件	交直変換機	国際分	国内分	総額
R1 サハリン–柏崎	すべて海底線	4台	4,305億円	-	4,305億円
R2 サハリン–石狩–柏崎	すべて海底線	6台	1,961億円	2,658億円	4,619億円
R3 サハリン–稚内–石狩–柏崎	陸上は架空線	6台	1,100億円	4,630億円	5,730億円
R4 サハリン–石狩–苫小牧–福島	陸上は地中線	6台	1,961億円	3,303億円	5,264億円

表10：日韓連系建設費の全体像（国内ルート含）

ルート	条件	交直変換機	国際分	国内分	総額
K1 プサン–舞鶴	すべて海底線	4台	2,465億円	-	2,465億円
K2 プサン–松江–日野	松江–日野は増強	4台	1,718億円	306億円	2,024億円
K3 プサン–伊万里/大分–伊方	すべて海底線	8台	1,290億円	833億円	2,123億円

建設費の総額への影響は限定的だが、必要と思われる追加検討コスト項目として、① その他の敷設関連費用：敷設船の艤装・解体等に関する費用、② 運転維持(O&M)：一般的に、建設費用の総額に対して年間当たり1～3%程度、③ ルート調査：調査内容や距離にもよるが、場合によっては数十億円以上、④ 資材価格の変動：ケーブルの導体である銅等の価格は、原料価格相場にて変動、⑤ 漁業補償等：陸揚げ点近傍等にて漁業が行われている場合、補償を行う場合がある、⑥ 環境アセスメント、などがある。

出所:自然エネルギー財団作成

第　４　章

国際連系線のビジネスモデル

1. 投資回収のためのビジネスモデルと試算結果

アジア国際送電網研究会中間報告書および欧州・北米調査、先行研究などから、国際連系線の投資回収方法は、以下四類型（およびその組み合わせ）に分類される。

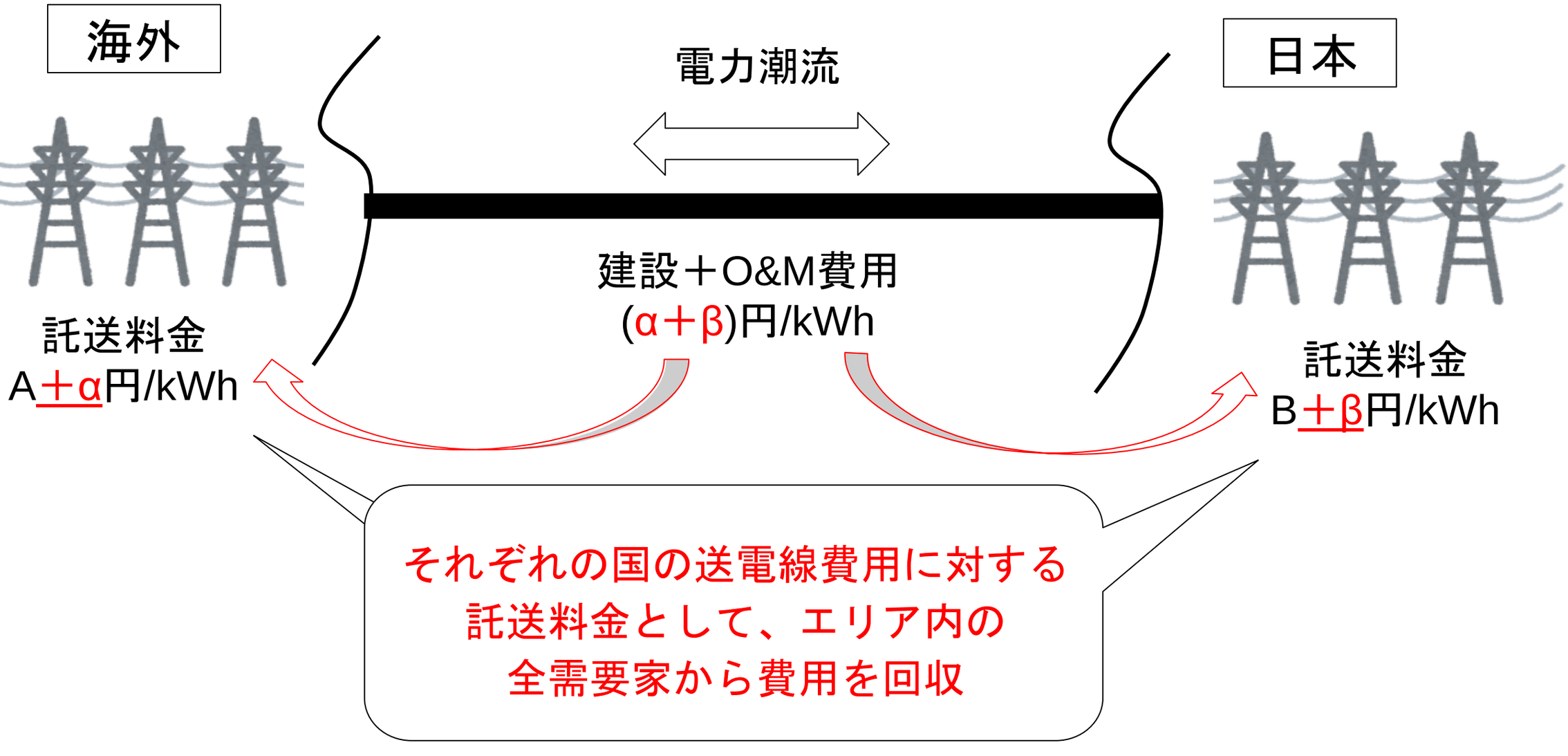
表11：国際連系線投資回収のためのビジネスモデル類型

投資回収モデル	内容	事例
1）売電モデル	特定の発電所や供給者から特定の需要家・市場への電力供給プロジェクトの一環として送電線を敷設し、売電収入によって送電線の投資回収が行われる。	ロシアー中国間 カナダー米国間
2）託送料金モデル	国際連系線の建設費および維持費は、送電事業者の総括原価とみなされ、事業エリア内の全需要家が送電費用に対する託送料金を負担することで投資を回収する。	Skagerrak 4 （デンマークーノルウェー間）
3）送電権販売モデル	送電事業者は、発電事業者や小売電気事業者等に対し、送電線を利用する権利を販売し対価を得る。	欧州地域市場間 北米PJM
4）混雑収入モデル	市場連結（Market Coupling）している市場間に敷設された送電線に送電混雑（市場分断）が発生した際、送電事業者は「卸電力取引価格の値差×実際の送電電力量」を収入として得る。	

出所:自然エネルギー財団作成

2）託送料金モデル：試算の前提条件

国際連系線の建設費用およびO&M費用を、海外の送電事業者と日本の送電事業者（今回は一般送配電事業者を想定）が負担すると想定。投資回収は、それぞれのエリアにおける送電費用に対する託送料金に加算して行う。



出所:自然エネルギー財団作成

2）託送料金モデル：試算結果（日露ルート・日韓ルート）

自然エネルギー財団 RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

試算条件

投資回収期間	25年	
O&M率	初期投資費用の1～3%	
託送料金設定値	0.06～0.10円/（0.01円毎）	
日本側負担割合	国際分の50%と国内分の100%との合計	
電力需要量	東京電力管内	2,899億kWh
	関西電力管内	1,486億kWh
	中国電力管内	602億kWh
	九州電力管内	857億kWh

表14：日露ルート（単位IRR %）

託送料金設定値	託送料金負担エリア (電力需要量)	0.06円 /kWh	0.07円 /kWh	0.08円 /kWh	0.09円 /kWh	0.10円 /kWh
【R1】サハリン－柏崎 （建設コスト4,305億円）	東京電力 パワーグリッド管内 （2,899億kWh）	1.9～ 5.0 %	4.0～ 6.8 %	5.9～ 8.5 %	7.7～ 10.1 %	9.3～ 11.7 %
【R2】サハリン－石狩-柏崎 （建設コスト：4,619億円）		-5.5～ -0.4 %	-3.1～ 1.1 %	-1.3～ 2.4 %	0.3～ 3.7 %	1.7～ 4.8 %
【R3】サハリン－稚内－石狩－柏崎 （建設コスト：5,730億円）		-13.6～ -3.7 %	-9.1～ -2.3 %	-6.5～ -1.0 %	-4.6～ 0.1 %	-3.1～ 1.1 %
【R4】サハリン－石狩－苫小牧－福島 （建設コスト：5,264億円）		-8.4～ -2.0 %	-5.6～ -0.5 %	-3.6～ 0.8 %	-1.9～ 1.9 %	-0.5～ 3.0 %

表15：日韓ルート（単位IRR %）

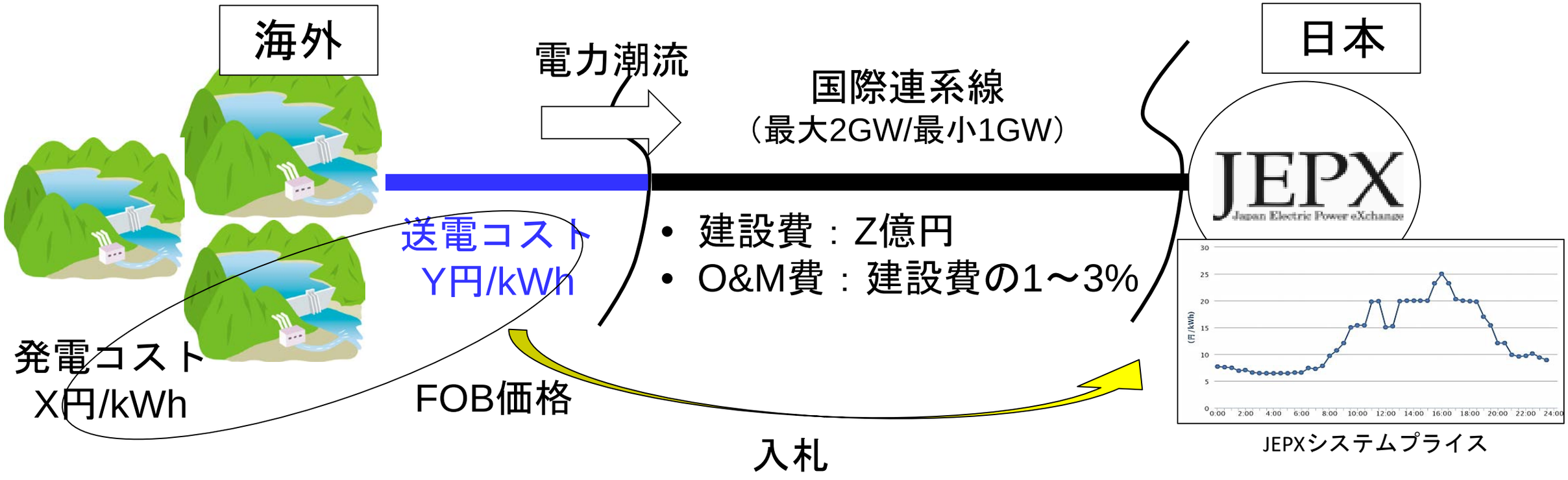
託送料金設定値	託送料金負担エリア (電力需要量)	0.06円 /kWh	0.07円 /kWh	0.08円 /kWh	0.09円 /kWh	0.10円 /kWh
【K1】プサン－舞鶴 （建設コスト：2,465億円）	関西電力管内 （1,486億kWh）	0.4～ 3.8 %	2.5～ 5.5 %	4.4～ 7.1 %	6.0～ 8.6 %	7.6～ 10.0 %
【K2】プサン－松江-日野 （建設コスト：2,024億円）	中国電力管内 （602億kWh）	-18.9～ -4.4 %	-11.1～ -3.0 %	-8.0～ -1.8 %	-5.9～ -0.7 %	-4.2～ 0.3 %
【K3】プサン－伊万里/大分－伊方 （建設コスト：2,123億円）	九州電力管内 （857億kWh）	-12.3～ -3.4 %	-8.4～ -2.0 %	-5.9～ -0.7 %	-4.1～ 0.4 %	-2.6～ 1.5 %

※赤枠は各条件において試算した結果のIRR中央値が正の範囲

出所:自然エネルギー財団作成

1）売電モデル：試算の前提条件

海外の発電所もしくはサプライヤから日本市場への一方向の電力供給および販売を想定して試算。投資回収は、電力販売に伴って得られる収入によって行う。



JEPXシステムプライス

出所:自然エネルギー財団作成

1）売電モデル：試算結果　（日露ルート）

自然エネルギー財団 RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

試算条件

投資回収期間	25年
O&M率	初期投資費用の1～3%
供給電力	最小１GW、最大２GW
JEPX価格	2016年および2017年の各１年分（30分毎）
FOB価格設定値	5～9円/kWh（1円毎）

※試算では、発電コストをX（円/kWh）、送電コストをY（円/kWh）とし、その合算X+Y（円/kWh）を原価（FOB価格）としてJEPXへ入札。入札値と原価との差額で建設費Z（億円）を回収。なお、JEPXの約定値は、日本側接続地点の2016年および2017年データを使用。

表12：日露ルート　売電モデル試算結果　（単位　IRR %）

FOB 価格設定値	5円/kWh	6円/kWh	7円/kWh	8円/kWh	9円/kWh
【R1】サハリン－柏崎（売電市場：JEPX東京エリア、建設コスト：4,305億円）					
1GW	2.3～7.1 %	-1.3～4.3 %	-5.6～1.2 %	-11.4～-2.3 %	最大 -5.2 %
2GW	12.9～18.0 %	8.4～13.7 %	4.1～9.1 %	0.3～4.6 %	-3.9～1.3 %
【R2】サハリン－石狩-柏崎（売電市場：JEPX東京エリア、建設コスト：4,619億円）					
1GW	1.3～6.2 %	-2.3～3.6 %	-6.8～0.5 %	-13.9～-3.0 %	最大 -5.9 %
2GW	11.7～16.6 %	7.3～12.5 %	3.1～8.2 %	-0.7～3.8 %	-4.9～0.6 %
【R3】サハリン－稚内－石狩－柏崎（売電市場：JEPX東京エリア、建設コスト：5,730億円）					
1GW	-1.6～3.8 %	-5.5～1.3 %	-11.6～-1.6 %	最大 -4.9 %	最大 -8.0 %
2GW	8.1～12.8 %	4.2～9.3 %	0.2～5.5 %	-3.7～1.6 %	-8.8～-1.4 %
【R4】サハリン－石狩－苫小牧－福島（売電市場：JEPX東京エリア、建設コスト：5,264億円）					
1GW	-0.4～4.7 %	-4.2～2.2 %	-9.4～-0.8 %	最大 -4.2 %	最大 -7.1 %
2GW	9.5～14.3 %	5.4～10.5 %	1.4～6.5 %	-2.5～2.5 %	-7.1～-0.6 %

※赤枠は各条件において試算した結果のIRR中央値が正の範囲

出所:自然エネルギー財団作成

1）売電モデル：試算結果　（日韓ルート）

自然エネルギー財団 RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

試算条件

投資回収期間	25年
O&M率	初期投資費用の1～3%
供給電力	最小１GW、最大２GW
JEPX価格	2016年および2017年の各１年分（30分毎）
FOB価格設定値	5～9円/kWh（1円毎）

※試算では、発電コストをX（円/kWh）、送電コストをY（円/kWh）とし、その合算X+Y（円/kWh）を原価（FOB価格）としてJEPXへ入札。入札値と原価との差額で建設費Z（億円）を回収。なお、JEPXの約定値は、日本側接続地点の2016年および2017年データを使用。

表13：日韓ルート　売電モデル試算結果　（単位　IRR %）

FOB 価格設定値	5円/kWh	6円/kWh	7円/kWh	8円/kWh	9円/kWh
【K1】プサン–舞鶴（売電市場：関西エリア、建設コスト：2,465億円）					
1GW	4.0～13.8 %	-1.2～10.1 %	-7.8～6.6 %	最大3.5 %	最大0.7 %
2GW	15.3～29.7 %	8.5～23.0 %	2.4～17.3 %	-3.1～12.5 %	-9.5～8.5 %
【K2】プサン–松江-日野（売電市場：中国エリア、建設コスト：2,024億円）					
1GW	6.8～17.4 %	1.4～13.0 %	-4.5～9.2 %	-13.0～5.7 %	最大2.7 %
2GW	19.7～36.3 %	11.8～28.2 %	5.1～21.5 %	-0.4～15.8 %	-5.7～11.3 %
【K3】プサン–伊万里/大分–伊方（売電市場：九州エリア、建設コスト：2,123億円）					
1GW	5.7～15.6 %	0.3～11.5 %	-5.7～7.9 %	-16.6～4.7 %	最大1.7 %
2GW	17.9～33.0 %	10.4～25.5 %	4.0～19.3 %	-1.3～14.2 %	-6.9～9.9 %

※赤枠は各条件において試算した結果のIRR中央値が正の範囲

出所:自然エネルギー財団作成

高橋からのコメント

技術的に可能か？：Technically Feasible?

- **日露連系（Japan-Russia）**
  - ・サハリン－柏崎：**1,255km**（最大水深300m）
  - ・サハリン－石狩－苫小牧－福島：**455**＋791＝1,246km
  - ・サハリン－稚内－石狩－柏崎：**161**＋1,097＝1,258km

- **日韓連系（Japan-Korea）**
  - ・プサン－舞鶴：**627km**（最大水深200m）
  - ・プサン－伊万里/大分－伊方：**226km**＋70km

※NorNed：世界最長580km（最大水深410m）、10年前に運開

※IceLink：1,070km、計画中

※伊SAPEI：水深1,600m

投資回収可能か？：Profitable?

- **日露連系（Japan-Russia）**
  - サハリン－柏崎：**4,305億円**
  - サハリン－石狩－苫小牧－福島：**1,961**＋3,303＝5,264億円
  - サハリン－稚内－石狩－柏崎：**1,100**＋4,630＝5,730億円

- **日韓連系系 (Japan-Korea)**
  - プサン－舞鶴：**2,465億円**
  - プサン－伊万里/大分－伊方：**1,290**＋833＝2,123億円

※NorNed建設費：€５億（580km・0.7GW）
※Atlantic Link建設費：$20億（計画：604km・1GW）

※国内送配電・変電投資額：1.8兆円（1993～2015年度平均）
※海底線単価：2.93億円/km、国内架空線単価：6.64億円/km

⇒売電モデル：FOB 6円/kWh以下
⇒託送料金モデル：追加 0.1円/kWh（対象地域による）

各国政府の動向：How Counterparts React?

●**中国（China）**
- 世界最大の風力・太陽光導入量
- 中国国家電網：世界最大の送電会社（TSO）
- GEI構想を主導：一帯一路構想にも沿って

●**韓国（Korea）**
- 韓国電力公社：Smart Energy Belt構想
- 文大統領の脱原発政策：「日本との国際連系が不可欠」
- 北朝鮮問題？

●**ロシア（Russia）**
- エネルギー輸出国：極東の豊富な電力供給力
- プーチン大統領：Energy Bridgeを提唱

⇒2017年12月：中韓の国際連系プロジェクトで合意

安全保障上問題ないか？

自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

⇒懸念：エネルギー安全保障（Energy Security Concern）

・電力供給を他国に依存して大丈夫か？

・他国の供給不安により停電が起きないか？

●安定供給のための国際連系：For Stable Power Supply

・究極の広域運用としての国際連系

・リザーブの共有

・再エネの出力変動対策

●国際政治学の「経済的相互依存」：Economic Interdependence

・軍事中心：ゼロ・サム　⇒　経済中心：プラス・サム

・自国の利益のために、他国との協調が必要

⇒1951年：欧州石炭鉄鋼共同体（ECSC)の設立

電力貿易の実体的意味

自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

● **２GW連系線による電力貿易：How Large is Electricity Trade?**

・電力：2GW/151GW＝1.3%

※日本の最大電力：151GW（2015年度）

・電力量：2GW×8,760h×100%/9,490億kWh＝1.8%

※日本の年間総需要電力量：9,490億kWh（2015年度）

※日本の貿易相手国・地域：1位中国、3位韓国、4位台湾

※LNGのロシア依存度：8.8%

※石油の中東依存度：86%

● **安全保障の本質＝リスク分散：Risk Diversification**

・１次エネルギーだけでなく、２次エネルギーとしての輸出入

・複数の国際連系線：ネットワーク化によるリスク分散

日本政府の姿勢は？：Japan

●**これまでは慎重？：Relatively Cautious?**

・エネルギー安全保障上の懸念

・電力システム改革の途上

・アジア国際送電網研究会の状況はエネ庁に報告

●**2018年4月：「エネルギー情勢懇談会提言」**

「国際連系線を活用した再生可能エネルギー拡大という戦略」

「様々な課題があり、丁寧に検証しなければならない」

⇒政治的指導性が不可欠：Political leadership required

・「検証」から「実行」へ

ご静聴ありがとうございました。

Thank you for your attention!