

CCSのためのCO₂輸送方法の考察

石井希実子 大沢賢輝 平出隆志 宮村明孝

○プロジェクトの目的

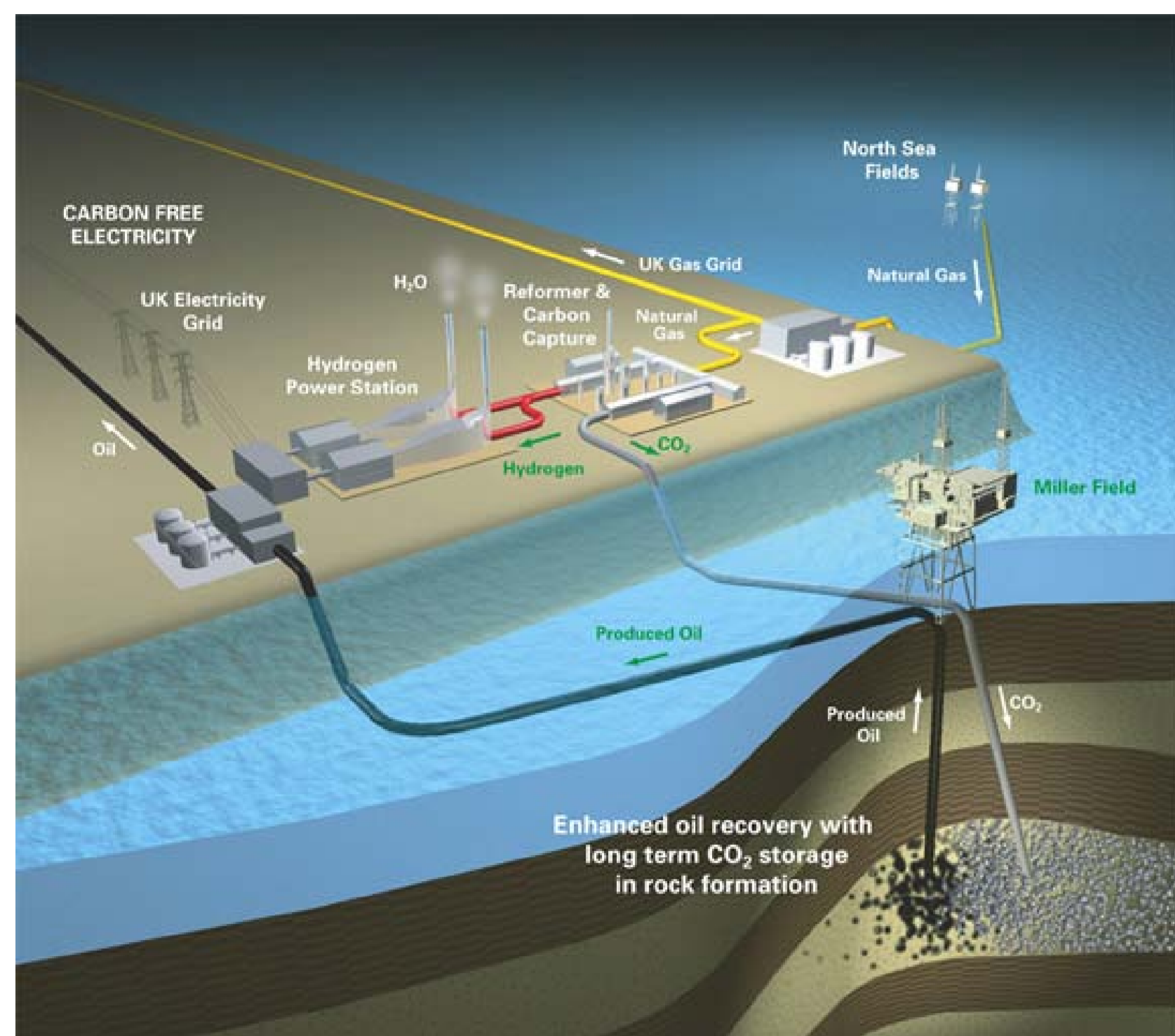


図1: CCSの概念図

出典: I.W.Wright, "Industrial Application of Hydrogen Manufacture from Fossil Fuels with 2 Geological Storage of CO₂", bp.

大気中のCO₂を削減するために有効な手段として、帯水層などにCO₂を隔離貯留するCCSという技術が考えられている。ただし、CCSを行うためには、CO₂を排出源から貯留層まで運ぶ必要がある。

流体の輸送手段には、パイプラインや船舶、自動車などが考えられるが、短距離(1000km以下)かつ大量の流体を輸送するにはパイプラインがもっとも合理的な方法である。

そこで、国内においてCO₂を輸送することを仮定して、パイプラインを用いた輸送ルートとパイプラインの緒元の決定、さらにコストの試算を行った。

なお、ルート選定の際には、主な排出源を石炭火力発電所と製鉄所に限定し、また隔離する量の目標として、これらの排出量の20%と設定する。貯留先には日本近海の帯水層を利用する。

○輸送流体の相変化

輸送効率を考えると、流体は輸送の時にすべて液体あるいは超臨界状態になっている必要がある。

輸送流体はさまざまな成分が混ざっている混合気体なので、その組成による相変化を考える必要がある。

図2: 流体の気体成分の組成による相変化

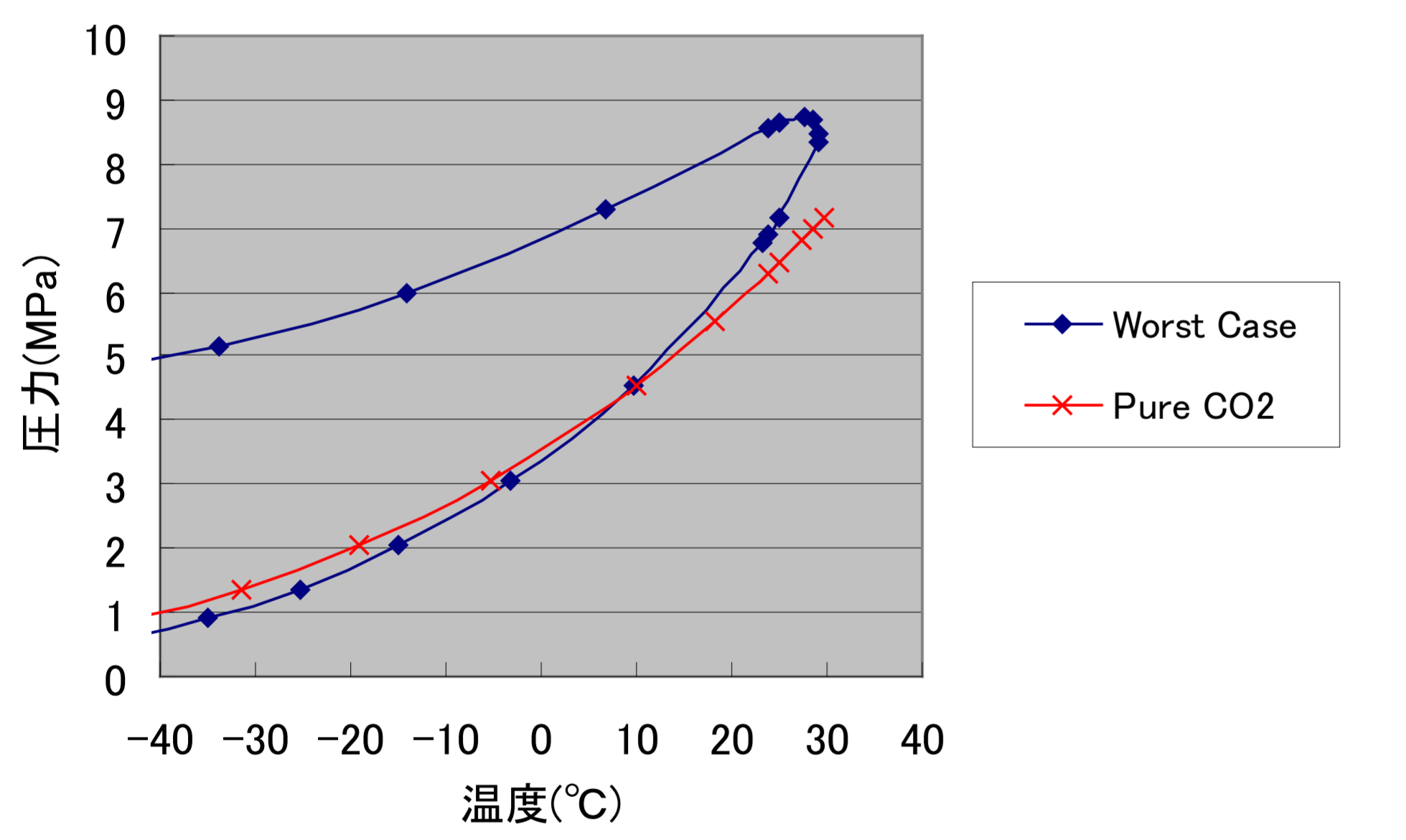


図2: 流体の気体成分の組成による相変化

図2が、パイプを通る気体の混合成分の違いによる相変化を表している。CO₂の分離が最も出ていないWorst Caseでの組成は、Julia Raciによると

CO₂:90% N₂:4% O₂:1.7% So₂:1.5% Ar:2.8%

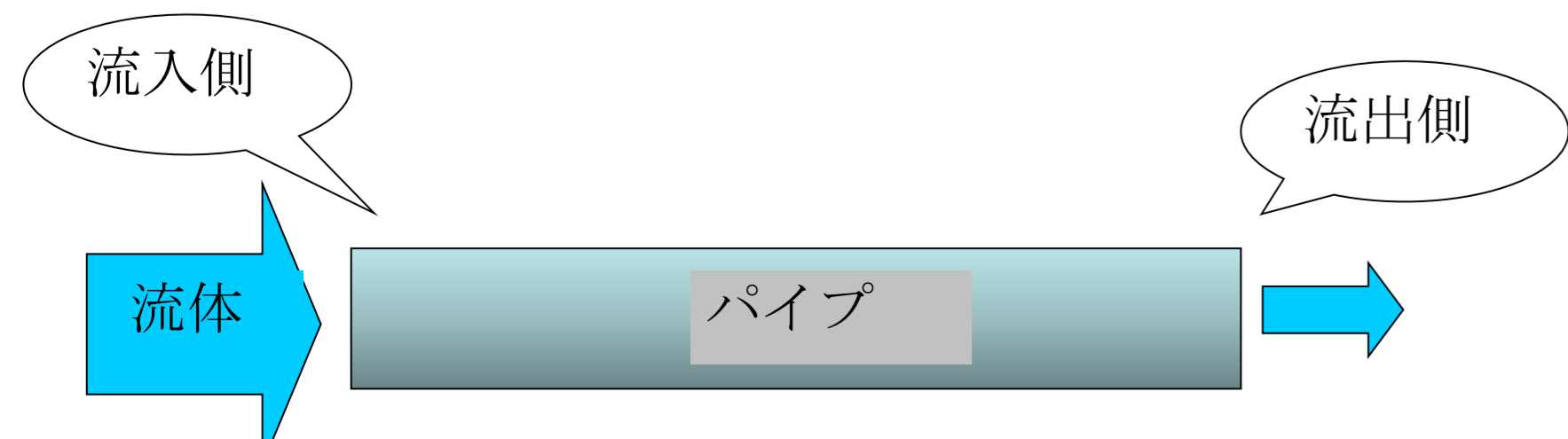
となっている。

この図より、常温においてすべての流体が超臨界状態でパイプを通すため、パイプ内流体の圧力は常に10MPa以上であることを条件とする。

○圧力欠損

パイプで流体を運ぶ場合、輸送距離が長くなるとパイプ内の流体の圧力が減少してくる(圧力欠損)。

そのため、流出側の圧力が10MPaでも、流入側の圧力はそれ以上に設定する必要がある。



流入側で20MPaだったとしても... 流出側では10MPaに... 減速して停止する。

図3: 圧力欠損の概念図

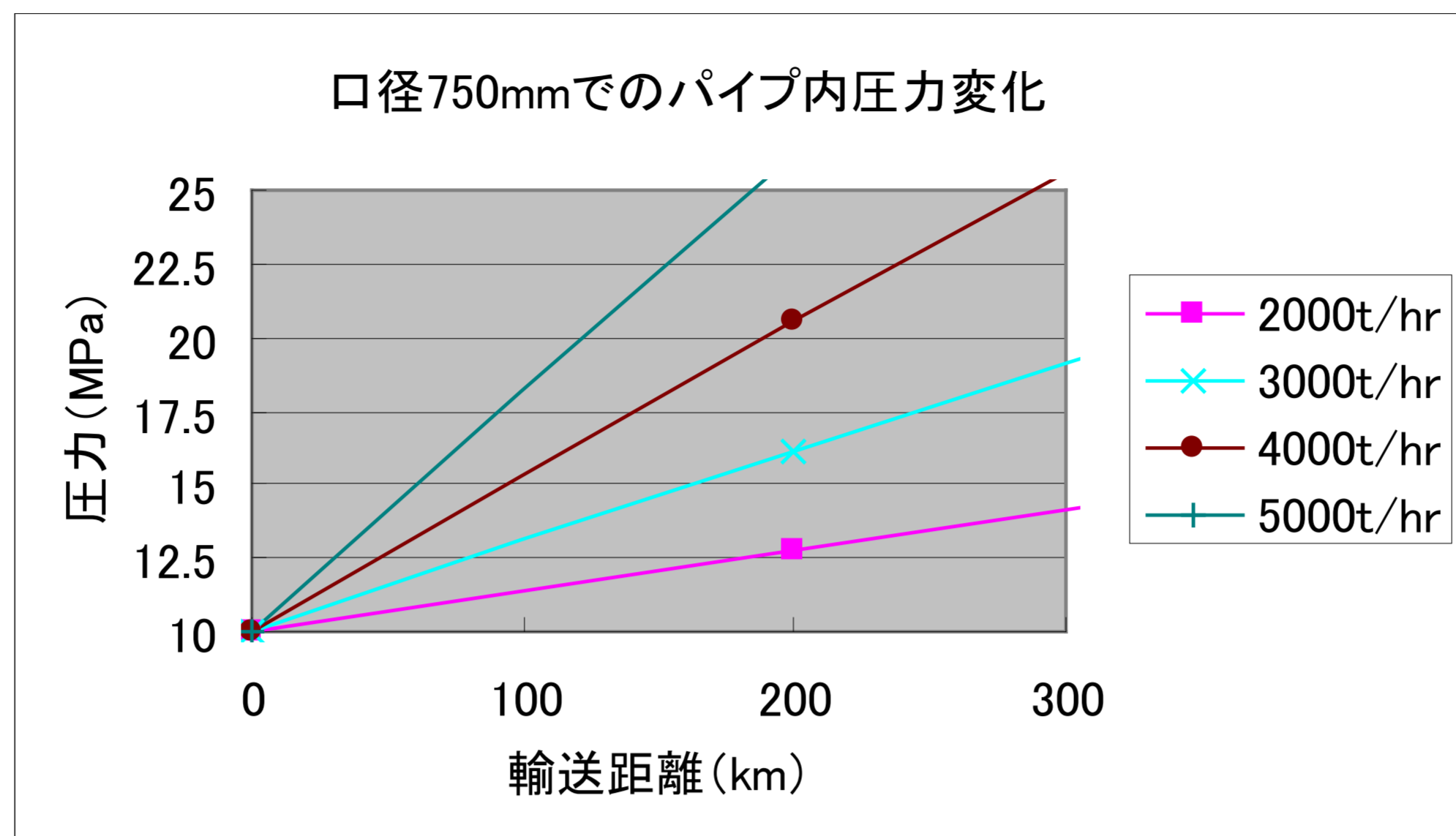


図4: 輸送距離と流量による、注入圧力の変化

図4が、流体の組成をWorst Caseとし、パイプの流出側の圧力が10MPaとなるための、輸送距離による必要な注入圧力である。

安全性を考慮し、注入圧力が20MPa以下となるようパイプの口径を決定する。

もっとも排出量の多いプラントでは

排出量: 2400万t/year (=2700t/hour)

貯留層までの距離: 180km

であるが、近くのプラントと合流させるため

最大輸送量: 3500万t/year (=4000t/hour)

とする。

この結果、必要なパイプの口径は口径750mmで、その際の注入圧力が19.6MPaとなる。

○ガス減圧曲線とき裂伝播抵抗曲線

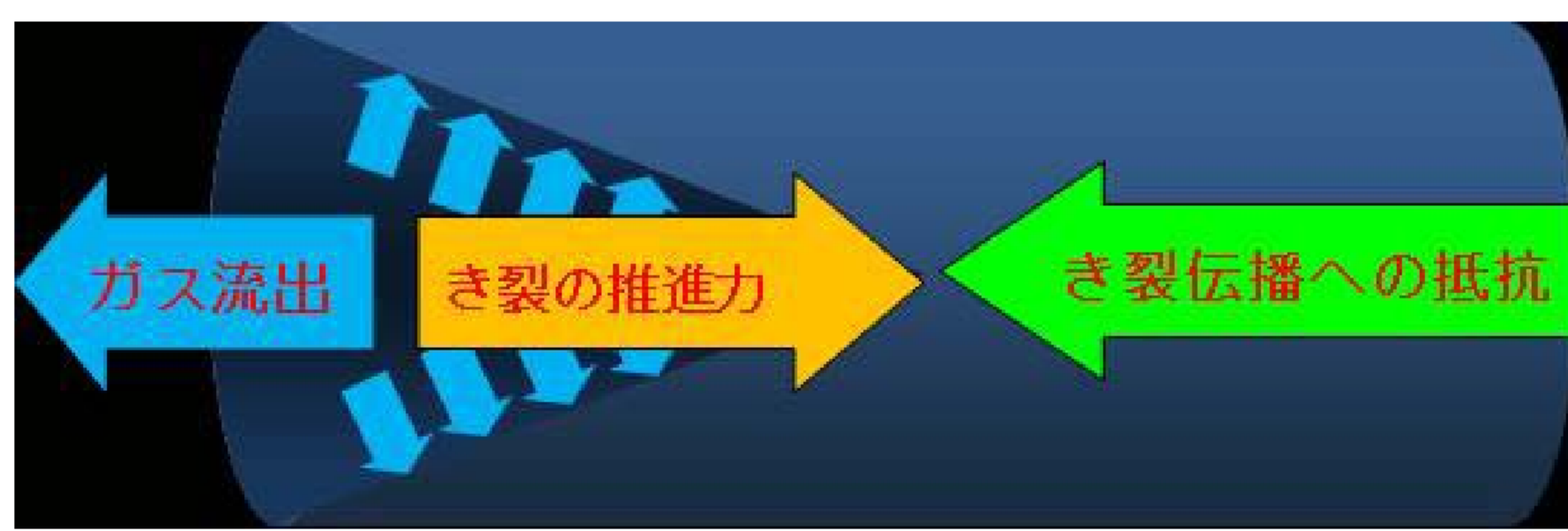


図5: パイプのき裂伝播の概念図

以下、CCSに適したパイプの設計までは栗飯原周二, "鋼管における破壊形態とその制御について"を参考にした。

○不安定延性き裂伝播

パイプにき裂が発生したとき、パイプ内の流体は流出し、パイプ内は減圧する。この減圧は波として伝播し、減圧速度とガスの圧力の関係を示したガス減圧曲線で表すことができる。

一方、き裂の伝播速度とき裂先端位置の圧力(き裂の駆動力)の関係を示したき裂伝播抵抗曲線を描くことができる。これらから、パテル2曲線法により、き裂伝播/停止を判断することができる。

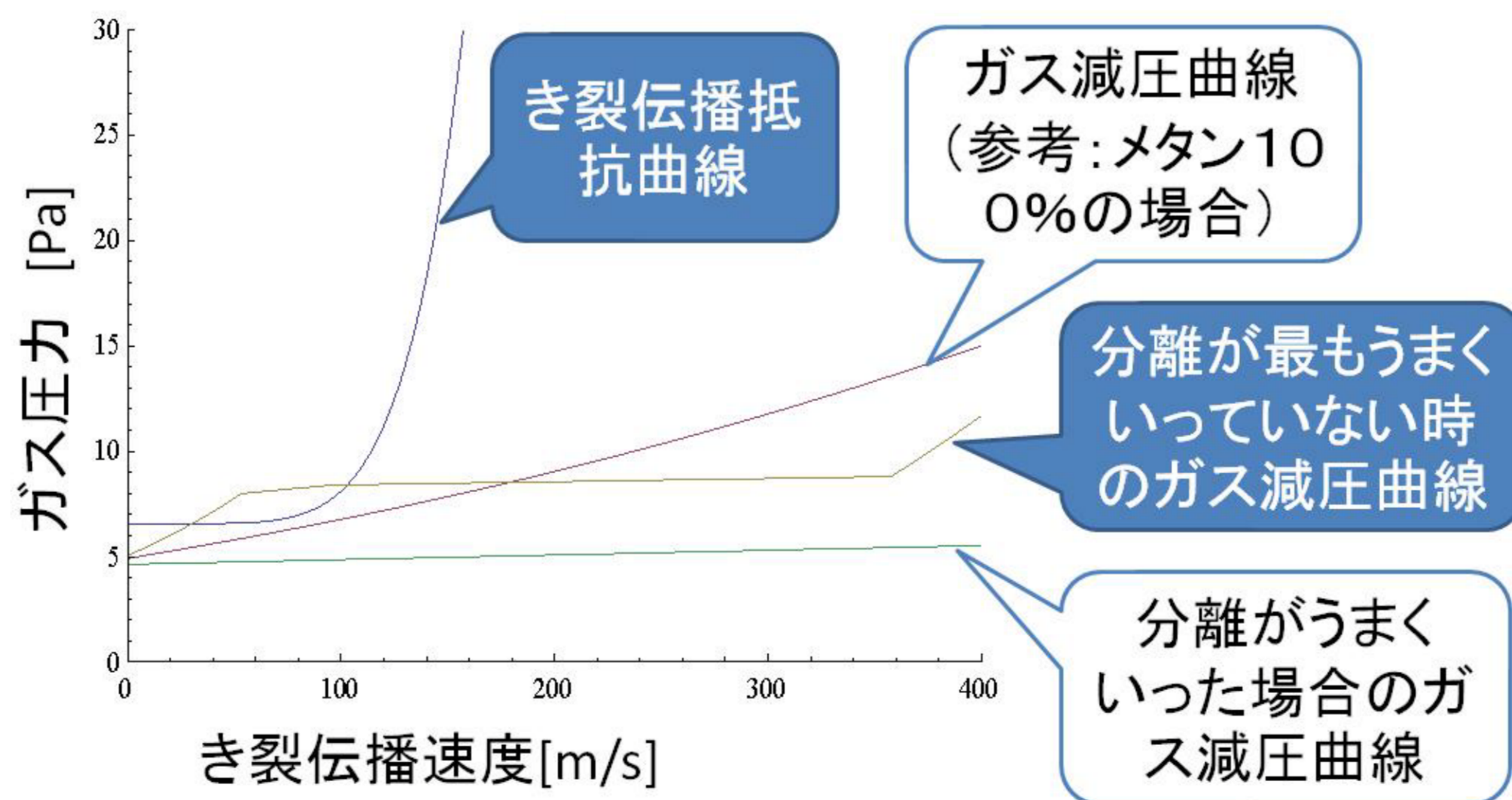


図6 き裂が無制限に伝播する場合
き裂伝播抵抗曲線がガス減圧曲線と交差する場合には、き裂伝播と減圧の速度が釣り合うのでき裂は無制限に伝播する。

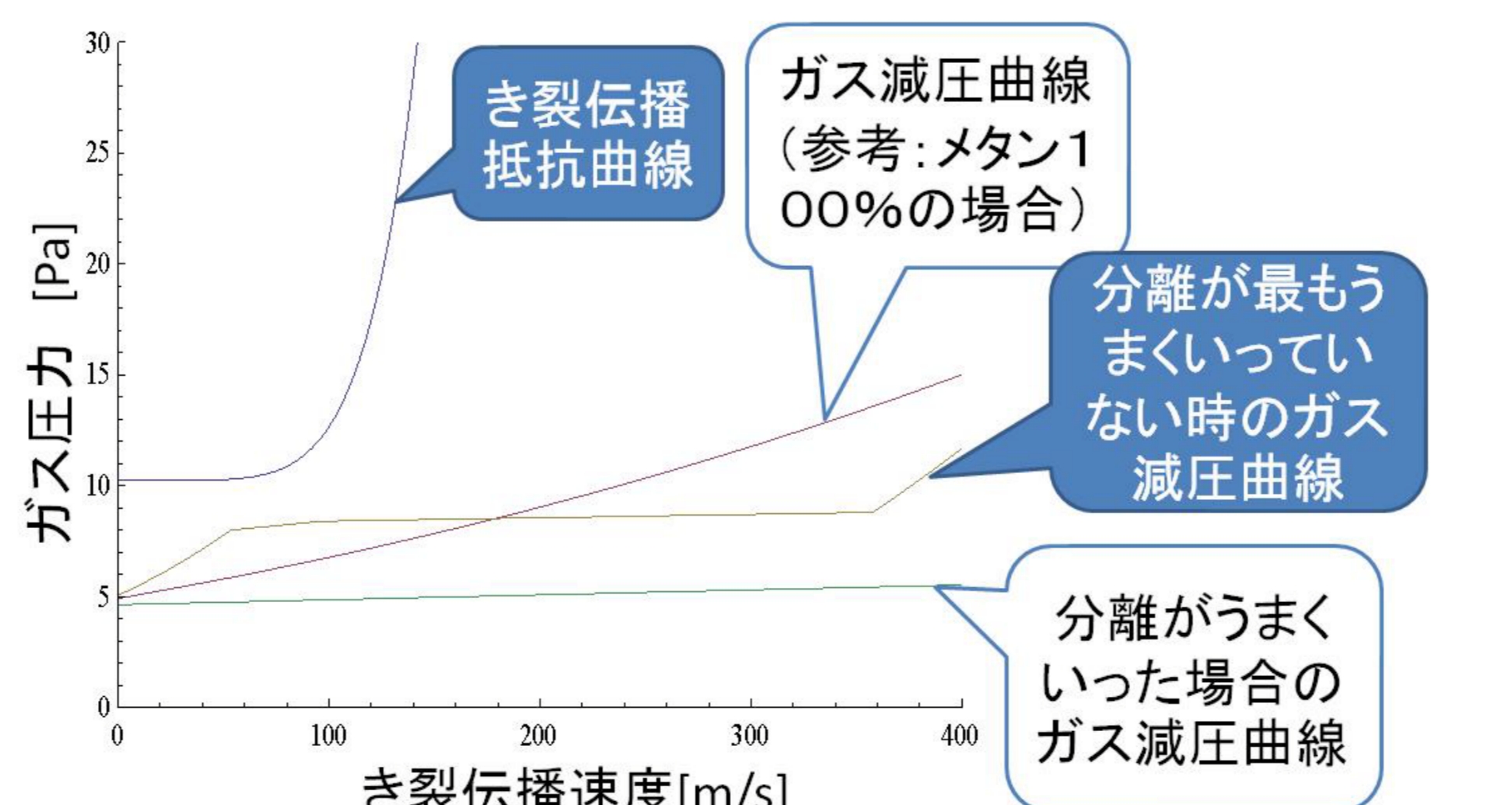


図7 き裂が直ちに停止する場合
2曲線が交点を有しないとき、ただちに減速して停止する。

○パイプの設計パラメタ

○パイプの厚さ

ガスの注入圧力、パイプの直径を決めれば、設計数からパイプの厚さを求めることができる。今回は、注入圧力を20MPa、管直径を750mmとして計算した。

※設計数=周方向応力/降伏応力

『安全度』を示す値。小さいほど安全と言える。

日本では0.4と定められている。

パイプの降伏応力は、鋼管の規格で定められている。例えばX50鋼管は、降伏応力が50ksiであることを意味する(ここでksiは圧力の単位)。

国外では0.72と定められている場合がある。

○パイプの必要靱性値

靱性値は、『もろさ』を表す。値が小さいほどもろいと言える。

なお、靱性と強度は独立した概念である。

前述のパテル2曲線法から、パイプに必要な靱性値を求めることができる。

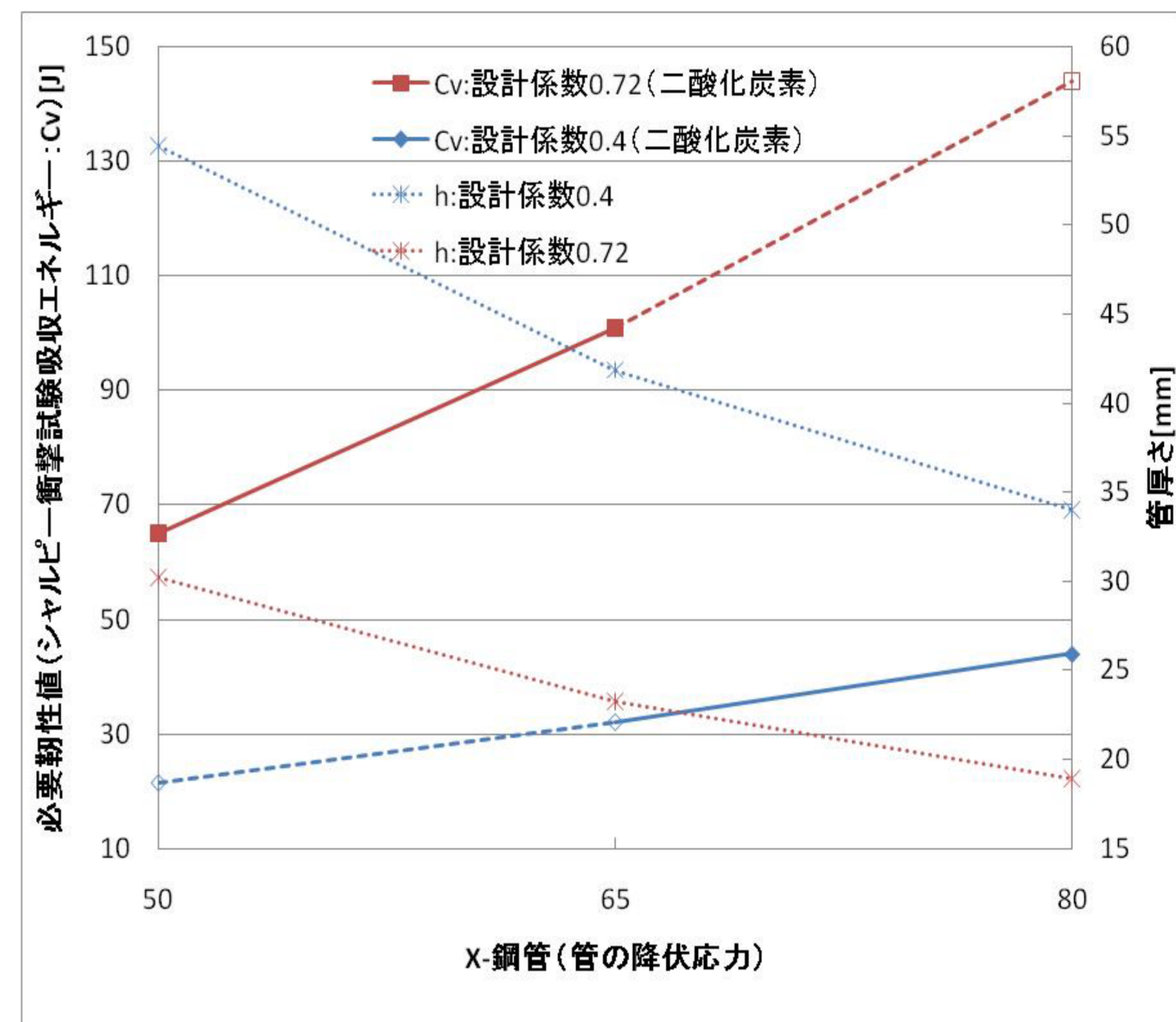


図8: X50,X65,X80鋼管での必要靱性値と管の厚さ

注: 必要靱性値のグラフで点線部分は実現が難しい。パイプを実際に製作する際の制約から、靱性値は最大110J、管厚さは最大40mmとしたため。

設計数が0.4の場合はX80鋼管を使用するしかない。設計数が0.72の場合はX50鋼管かX65鋼管を使用できる。これより、設計数が大きいほうが低~中強度の鋼管を使用でき、使用する鋼管の選択枝が広がり、設計もしやすいことがわかる。

○CCSに適したパイプの設計

輸送効率とパイプに発生したき裂が伝播しないことを両立し、かつ管厚さと靱性値が現実的な値に収まる設計を提案する。国外の場合も考え、設計数は0.4と0.72の両方を考えた。

表1 CCSに適したパイプの設計パラメタ

注入圧力は20MPa、管直径は750mmとした国内の場合(設計数0.4)	
管の強度(使用する鋼管)	X80鋼管
管厚さ[mm]	34
必要靱性値[J]	44

国外の場合(設計数0.72)	
管の強度(使用する鋼管)	X50鋼管
管厚さ[mm]	30
必要靱性値[J]	65

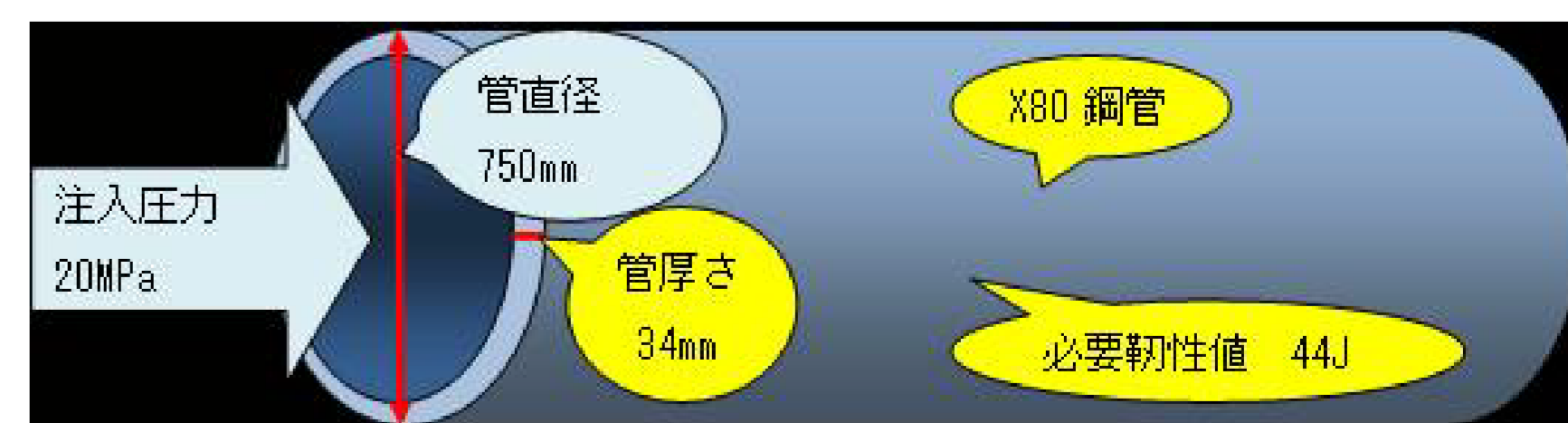


図9: 国内でCCSを行うのに適したパイプ

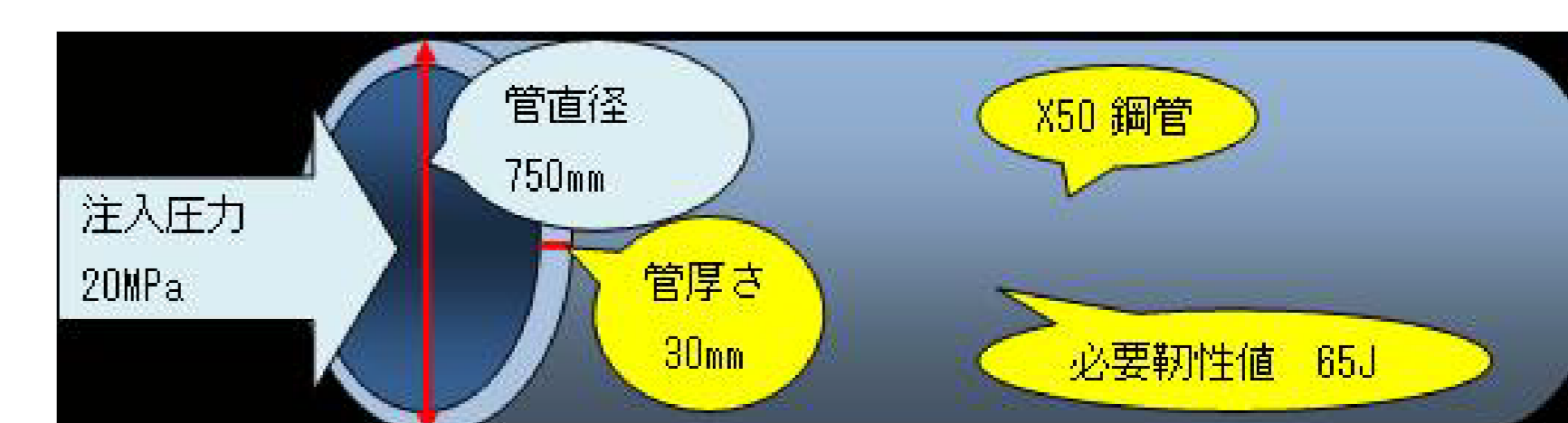


図10: 国外でCCSを行うのに適したパイプ

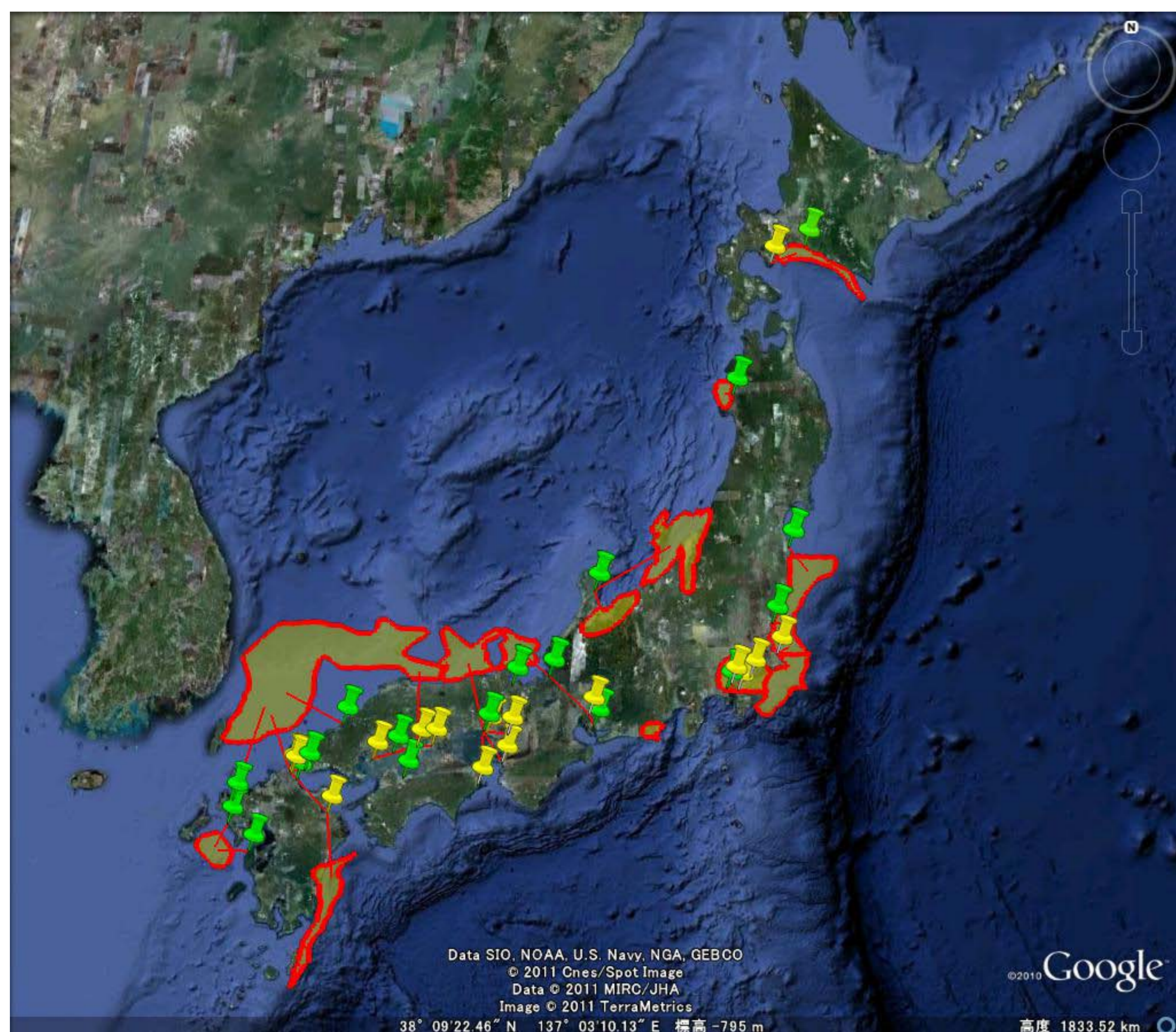


図11: 貯留サイトと排出源

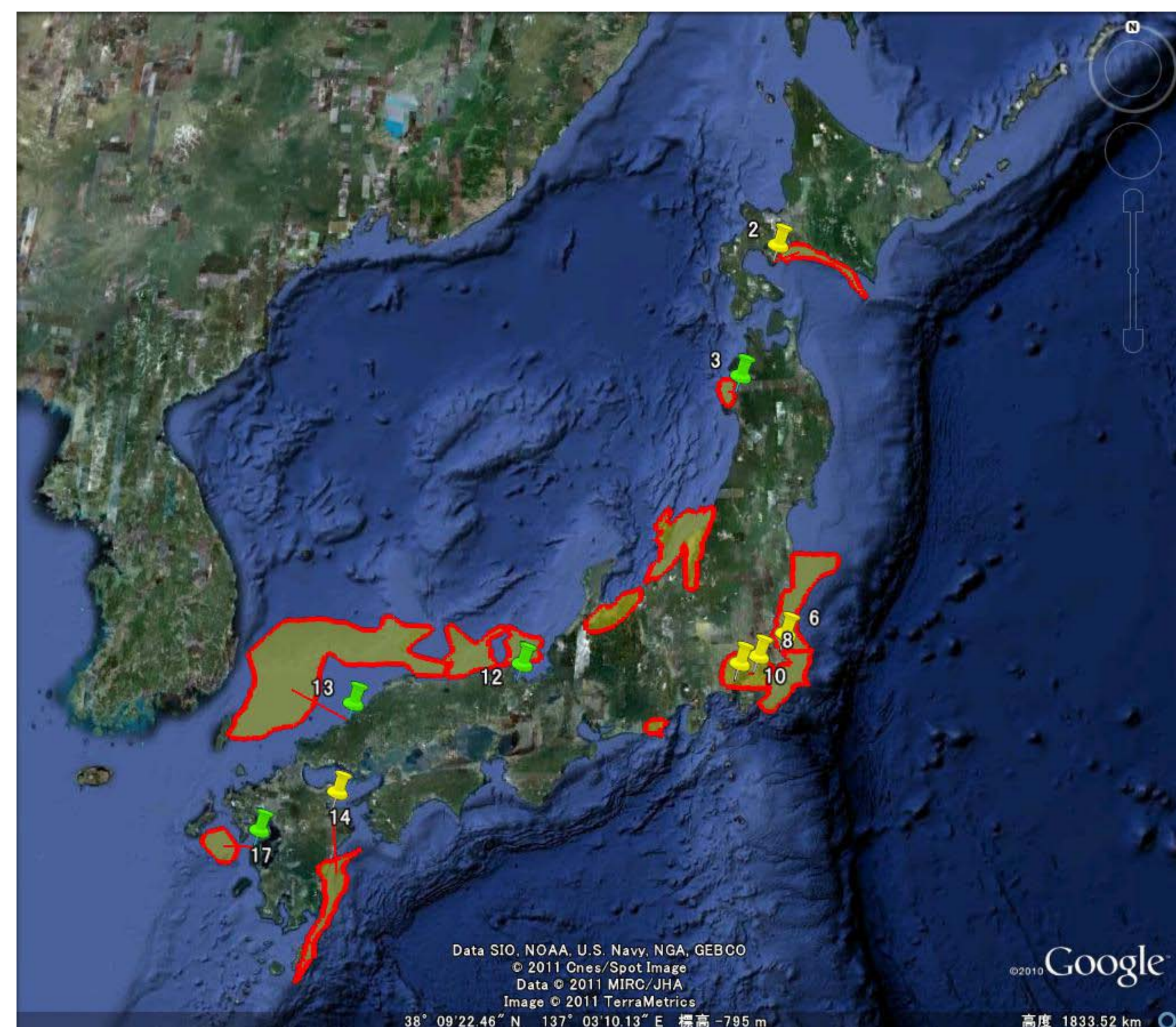


図12: 最適化後の排出源

○ルート最適化

今回は、日本のCO₂大規模排出源である石炭火力発電所、製鉄所をターゲットに、そのCO₂総排出量の20%を地中貯留することを目標にする。

まず、すべての排出源と貯留サイトの位置を示した図が図11である。排出源の位置や排出量は各電力会社および製鉄会社が出している環境報告書の2008年のデータを使用した。また、帯水層の貯留サイトについてはXiaochun Lia et al, "Near-future perspective of CO₂ aquifer storage in Japan: Siteselection and capacity", Energy 30 (2005) 2360-2369を参照した。

各々の排出源のCO₂排出量や、排出源と貯留サイトを結ぶパイプラインの長さにはかなりのばらつきがあるため、コスト的に有利である排出源を適当に選択する必要がある。

その際に考慮すべきなのは、排出源においてCO₂を圧縮するコンプレッサーのコストおよび、パイプラインそのもののコスト、そして排出源においてCO₂を隔離するコストである。

表2: 各排出源の排出量

発電所	年間CO ₂ 排出量(万t)	製鉄所	年間CO ₂ 排出量(万t)
a	1664.4	1	2059.1
b	1394.1	2	1742.3
c	836.4	3	1469.7
d	909.0	4	641.1
e	2834.8	5	437.8
f	894.2	6	803.0
g	894.2	7	1400.5
h	686.4	8	729.3
i	862.4	9	540.2
j	862.4	10	1318.7
k	842.7	11	281.3
l	238.7	12	761.2
m	464.1	13	738.6
n	929.2	14	1345.1
o	241.8	15	2445.0
p	340.3		
q	748.1		
r	311.7		
s	810.6		
t	1309.2		
u	623.4		
v	1246.8		
w	194.5		
x	9.4		

○コンプレッサーのコスト

CO₂を効率よく輸送するために、CO₂をコンプレッサーで圧縮し、超臨界状態にして輸送する必要があるが、そのコストは輸送するCO₂の量に依存している。その関係を示したのが図13である。

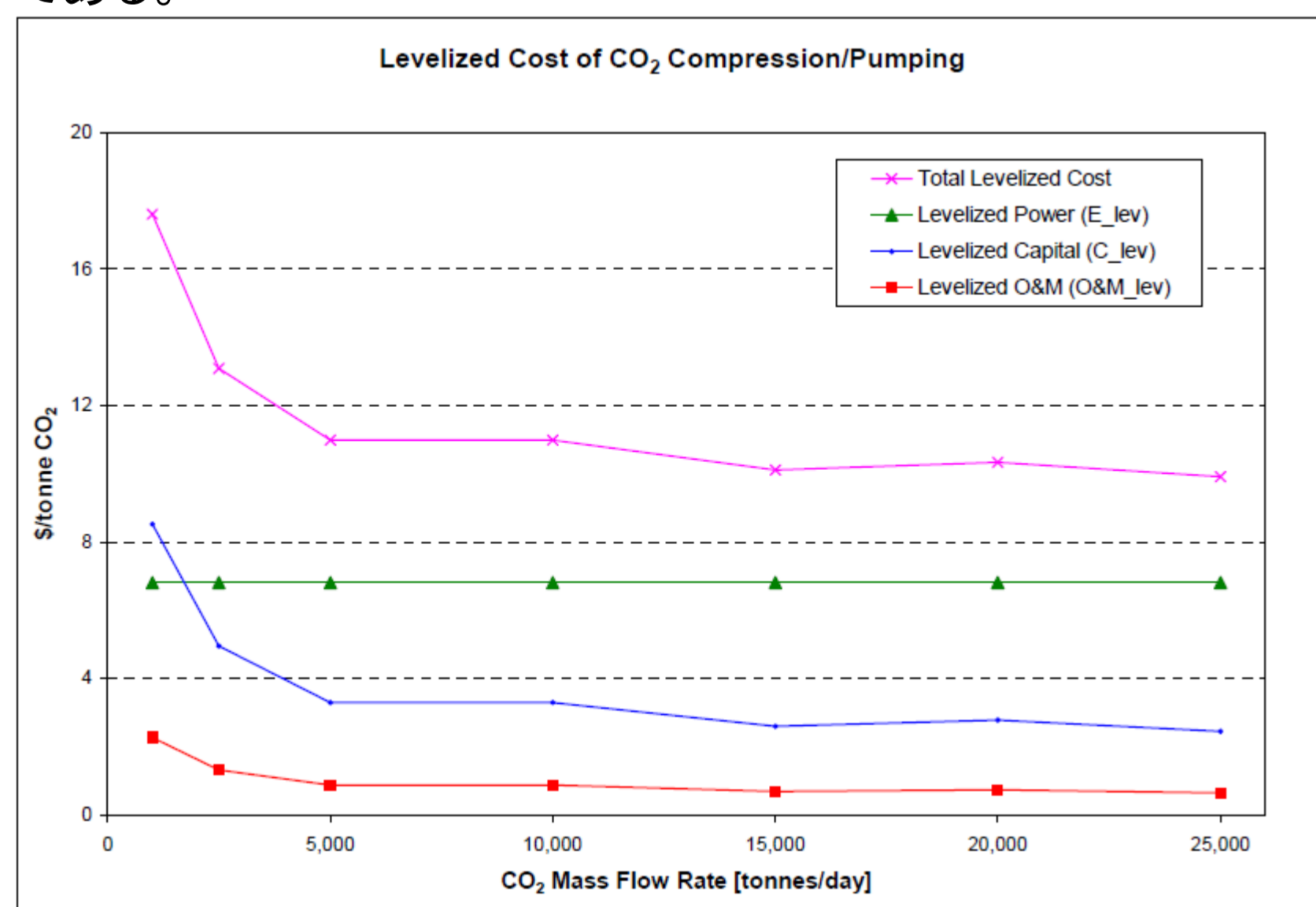


図13: コンプレッサーのコスト
出典: David L. McCollum, Joan M. Ogden ※1

実際には、CO₂はコンプレッサーとポンプを併用して圧縮され、送り出される。CO₂の流量が大きくなっても、ポンプが消費する電力は小幅にしか増加しない。そのため、流量が大きくなっても消費電力はほぼ横ばいとなっている。この他に、初期費用や維持費用を加えたものが図13のピンクの線で表したグラフである。これを見ても、1日5000tを超える流量がある場合、単位量のCO₂を圧縮するのに必要な費用はほとんど変わらないことが分かる。1日5000tとは年間約183万tであり、鬼首火力発電所を除く全ての本州の火力発電所及び製鉄所においてこの基準を上回っていることが分かる。そのため、どの排出源を選んだとしても、単位量のCO₂を圧縮するのにかかるコストはほとんど変わらないといつてよい。

○パイプラインのコスト

流体を輸送するパイプラインのコストは、流体の流量および長さに依存する。流体の流量が大きくなると圧力が大きくなり、パイプに要求される強度も大きくなるため、コストが高くなってしまふ。パイプラインのコストについては様々な研究機関が試算しており、それらをもとに平均的な値をとったものが図14のグラフである。

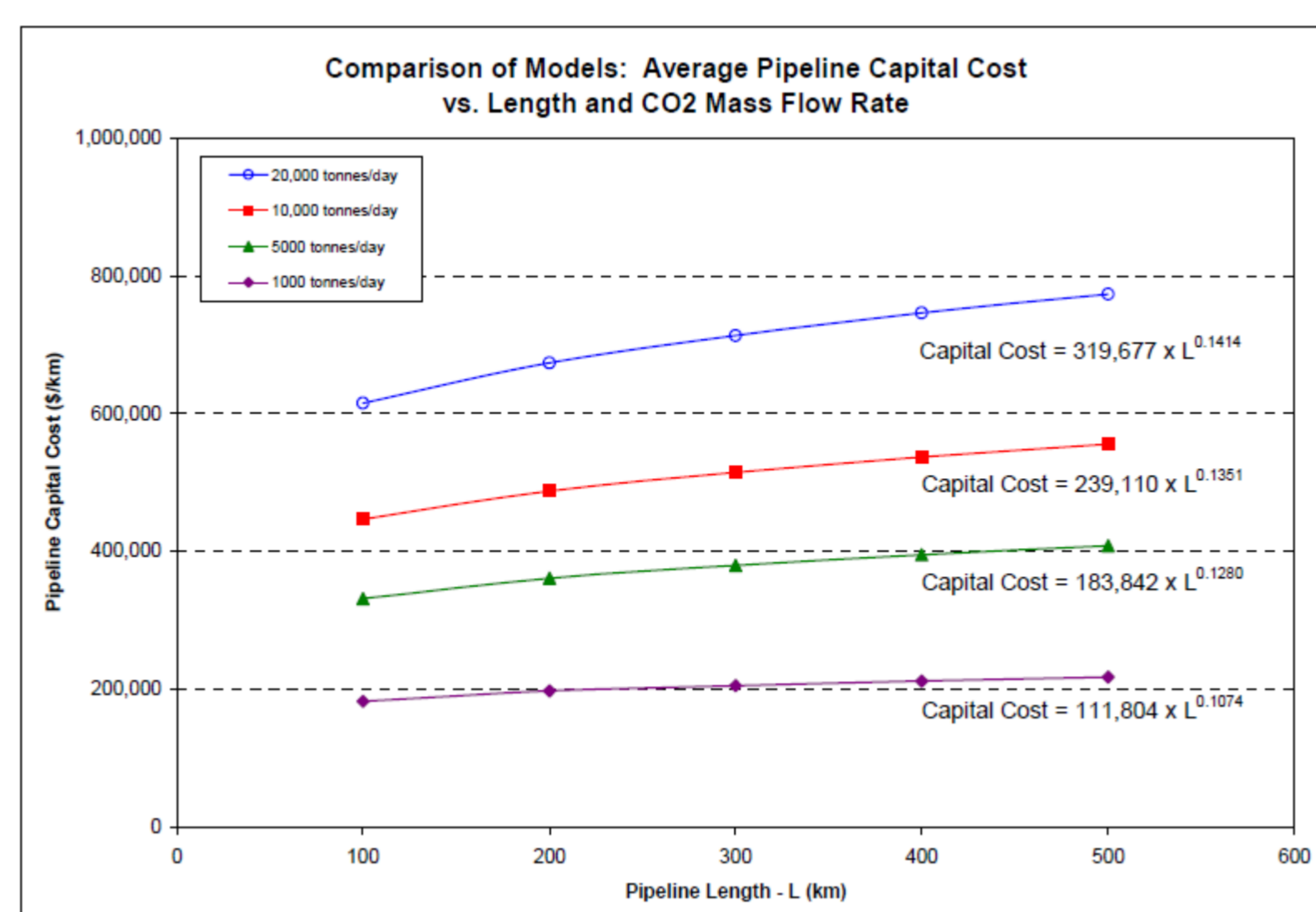


図14: パイプラインのコスト
出典: David L. McCollum, Joan M. Ogden ※1

さて、David L. McCollum, Joan M. Ogden は、これらの式を統合した形として、以下の式を提案している。

$$\text{Pipeline Capital Cost} = 9970 \times m^{0.35} \times L^{1.13} [\$/\text{km}] \quad (a)$$

ここで、 m : 流量[t/day] L : 長さ[km] により、パイプラインのコストが流量と長さの関数として計算できることになった。

○隔離コスト

パイプラインによって貯留サイトに運ばれたCO₂は、現地で帯水層に圧入され、隔離されるが、ここでもやはり流量に応じたコストがかかる。それを示したのが図15である。

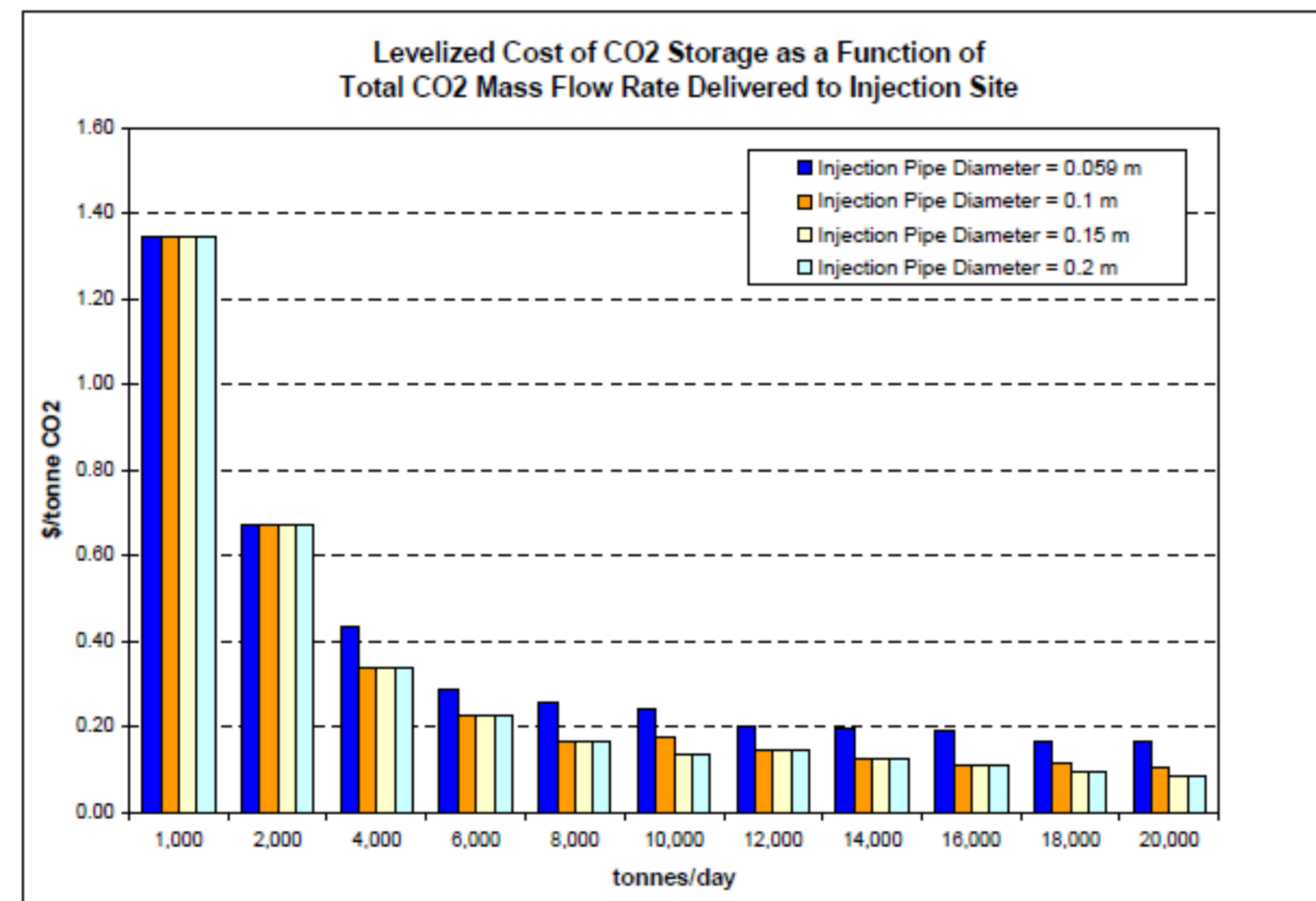


図15: 隔離コスト
出典: David L. McCollum, Joan M. Ogden ※1

○最適なルートを選択

以上の点を踏まえ、コストが最小となるように排出源および貯留サイトを選択することにする。コンプレッサーについては流量が十分に得られることから、単位量当たりのコストは一定であるとする。また、隔離コストは他の要素と比べて非常に小さいため、最適化の段階ではこちらは無視する。そのため、パイプラインのコストを最小化するルートを選択することで、ルートを最適化することにする。

計算ではMathematicaを用いた。まず、全てのCO₂排出量および最寄りの貯留サイトとの距離を入力し、(a)式に代入する。ここで、実際に回収できるCO₂は、排ガス中の90%程度であることを踏まえている。また、各々の排出源から貯留サイトにパイプラインを伸ばすよりも、1か所にまとめてから輸送したほうがよいと判断できる場所については、そのようにルートを設定し、プログラミングを行った。

そしてCO₂総排出量の20%以上は貯留するという束縛条件のもと、コストが最小となる排出源を選び出した。排出源から伸びるパイプラインの流量は $M_i p_i$ 、長さは L_i として、選択されたサイトについては p_i に1を返し、選択されなかった場合は0を返すようになっている。

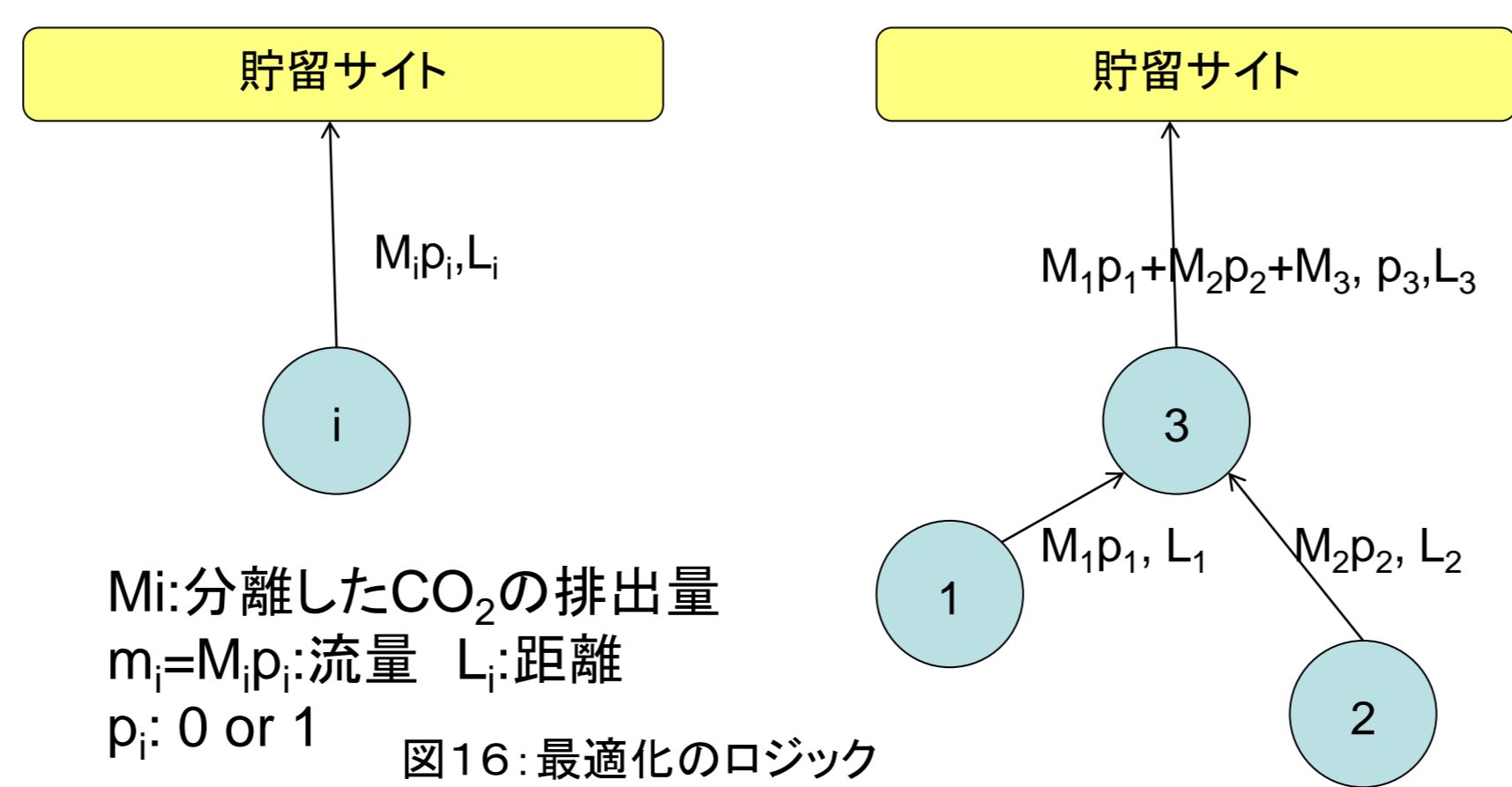


図16: 最適化のロジック
こうして選ばれた排出源が図12のように分布している。

○総コスト

排出源におけるCO₂の分離コストは現状技術開発中であり、3000円/t-CO₂までは達成可能。最終的な目標として2000円/t-CO₂と考えられている。

使用するパイプライン全体の輸送コストは、

総輸送量: 8400万t-CO₂/year

輸送コスト: 2.97億ドル

となつたため、1ドル80円とすると、1tあたりの輸送コストは

283円/t-CO₂

となる。

また、隔離に採用されたサイトはすべて1万t-CO₂/day以上の排出量であるから、輸送のためのコンプレッサーのコストはおおよそ

10ドル/t-CO₂ = 800円/t-CO₂

となる。

隔離にかかるコストはOgden's modelより1万t/day以上なので、

0.2ドル/t-CO₂ = 16円/t-CO₂

以下となる。

(参考資料: Techno-Economic Models for Carbon Dioxide

Compression, Transport, and Storage. Section I Part III)

これらの値は予測値であるから、変動が見込まれる。それらを含めて表したのが、図17である。

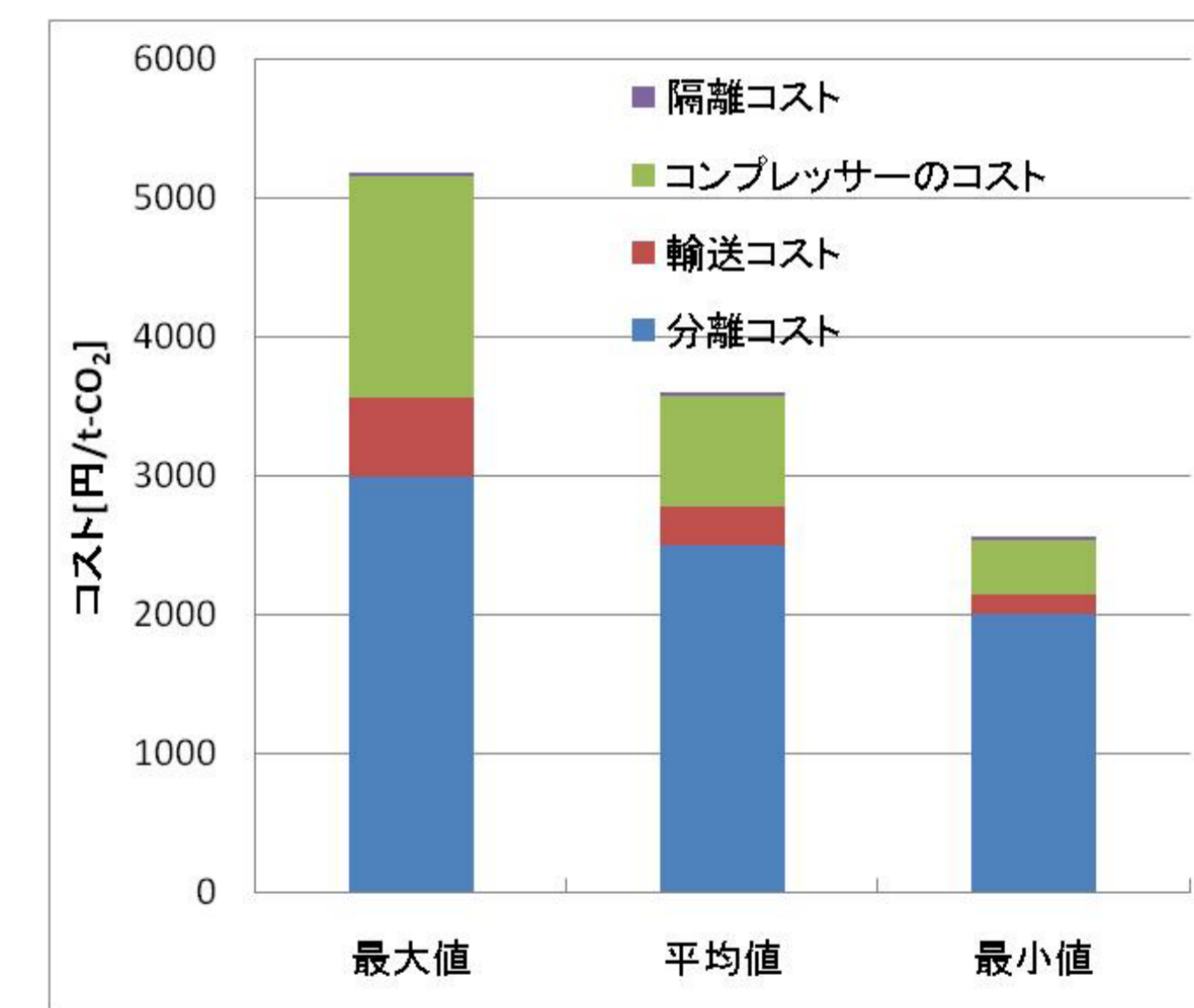


図17: 総コストの予測値

ちなみに、最適化せずに全ての排出源から20%ずつ輸送してCCSを行った場合、その輸送コストは約203億ドルになり、最適化する場合と比べて約67倍となる。これに加えて、排出源を数多くとることで、各々の地にコンプレッサーや貯留サイトでの圧入する施設が必要になるため、さらにコストが高くなってしまふ。CO₂の排出量が多く、貯留サイトとの距離が近い、適切な排出源を選んでCCSを行うことが大切である。そのため、各企業が個別にCCSに取り組むのではなく、CCS事業を確立して、日本全体として取り組んでいくことが非常に重要である。

○今後の課題

CCSが単独で商業的に成り立つには、炭素税や排出量取引が導入され、それらよりも安いことが条件となる。日本における炭素税の検討は2400円/t-CO₂であるから、現状の技術では政府から補助金を受け取る必要がある。そのため、特に総コストの中で大きな割合を占める分離コストを低下させるなどをして、コストをさらに下げる必要があるだろう。

~参考文献~

* 1: David L. McCollum, Joan M. Ogden, "Techno-Economics Models for Carbon Dioxide Compression, Transport, and Storage & Correlations for Estimating Carbon Dioxide Density and Viscosity, ITS UCDAVIS