

バイオマス発電所排ガスからの二酸化炭素の 分離・回収、貯留技術の検討

エネルギー研究会
松宮 紀文

バイオマス：生物「bio」+量「mass」＝「biomass」

- ・木質資源、下水汚泥、家畜糞尿、食物残渣等動植物から生まれた再生可能な有機性資源

注) 化石燃料(石油、石炭、天然ガス等)は植物資源であるが、作成期間が長く再生可能な資源ではない。

バイオマス発電

- ・バイオマス燃料を燃やして出る水蒸気やガスを使って、タービンを回して発電する、火力発電の一種。この電気の部分がグリーン電力となり、CO₂を排出せず、環境に負荷を与えないというメリットがある自然エネルギー。

バイオマス・ニッポン

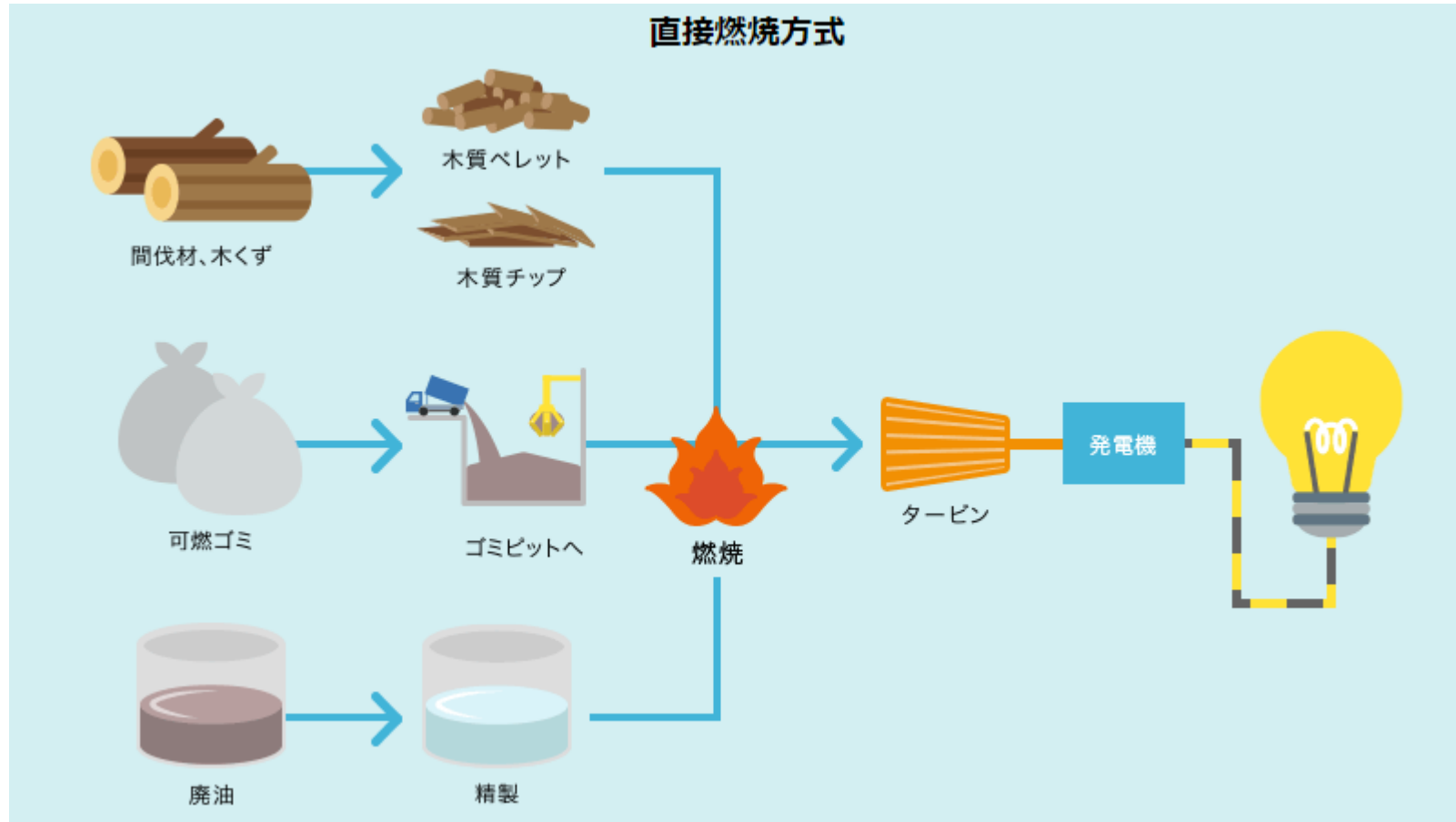
- ・地球温暖化防止、循環型社会形成、戦略的産業育成、農山漁村活性化等の観点から、農林水産省をはじめとした関係府省が協力して、バイオマスの利活用推進に関する具体的取組や行動計画を「バイオマス・ニッポン総合戦略」として平成14年12月に閣議決定。
- ・平成18年にはこの戦略が改訂され、平成21年には「バイオマス活用推進基本法」が制定された。

固定価格買取制度（FIT制度）

- ・平成24年7月に対象となった。

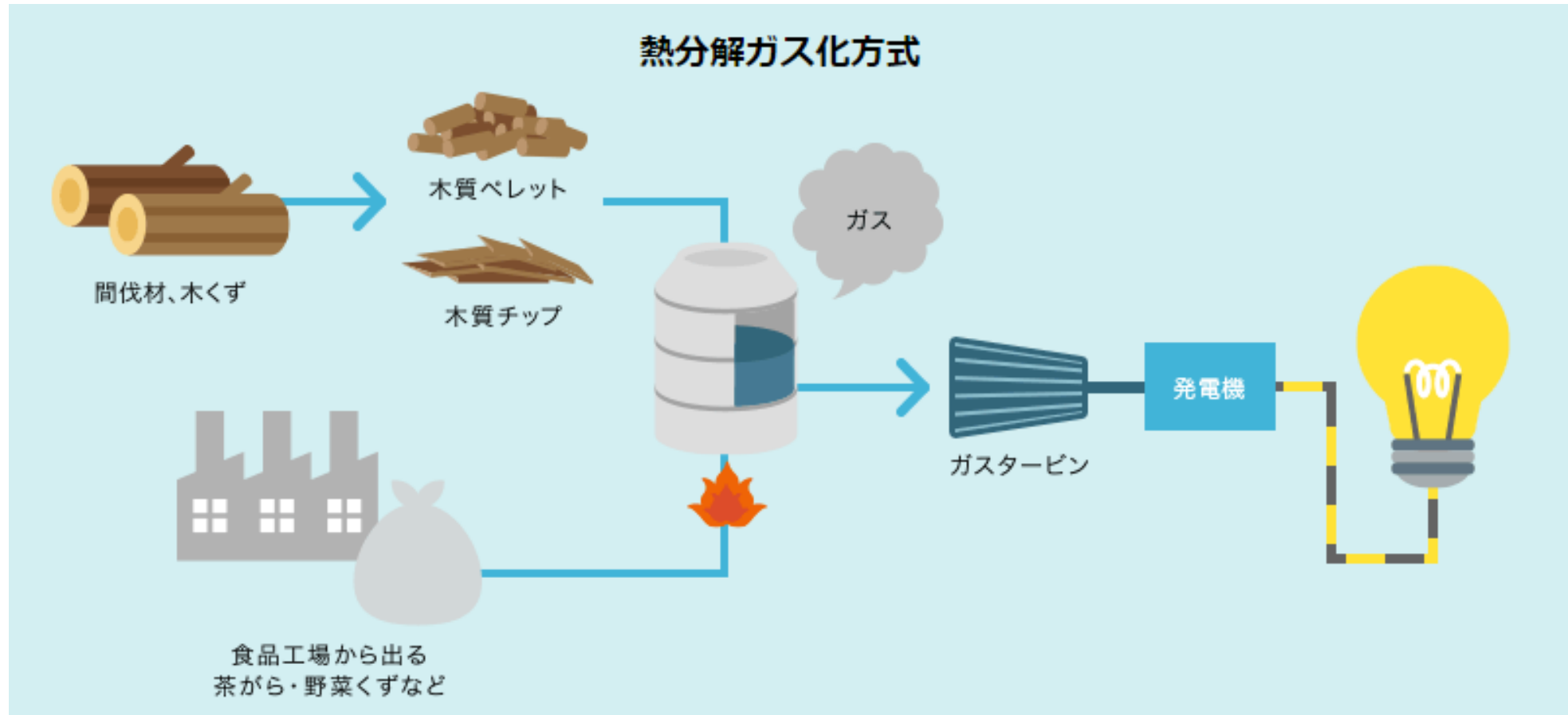
直接燃焼方式

木材などを燃焼させて水を沸騰させ、水蒸気でタービンを回して発電する方法。一般的な火力発電と同じ。直接燃焼方式は作り出せる温度が比較的低いので、大型の設備でないと効率が悪くなる。ただし、大型化設備は大量の木材を安定して調達する必要があり、木材の品質確保・収集・運搬・加工等が困難。



熱分解ガス化方式

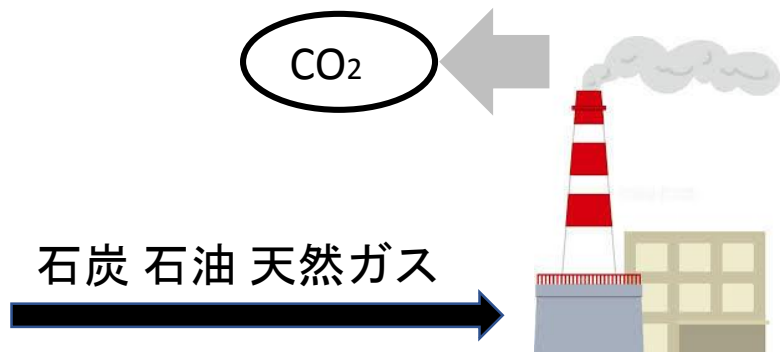
木材などを高温で蒸し焼き（熱処理）にした際に発生する可燃性の熱分解ガスを燃料にして、タービンを回して発電する。このガスを発電に用いるのが直接燃焼方式との違い。燃焼温度が比較的高く、また燃料の可燃成分を最大限活用できるため、直接燃焼方式よりも規模の小さい発電所を経済的に作りやすい特徴がある。



BECCSについて

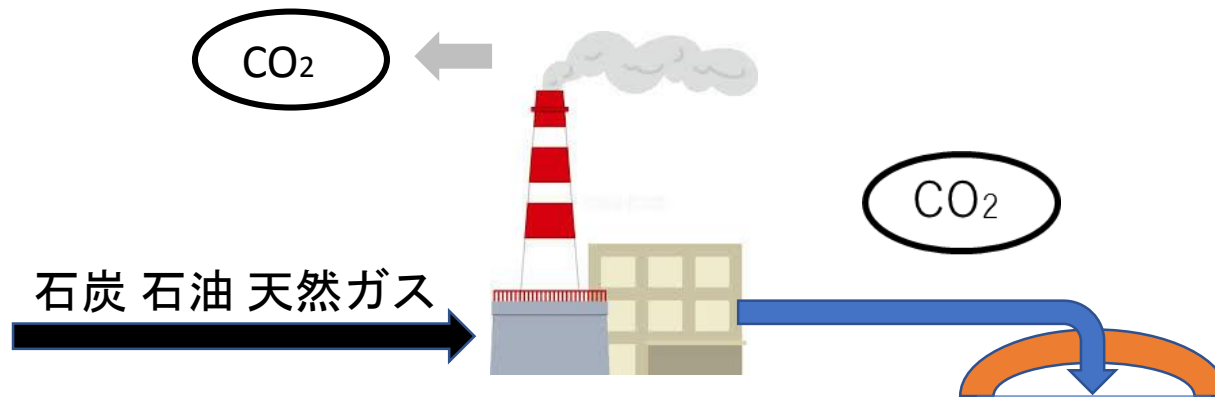
化石燃料発電

Positive emission



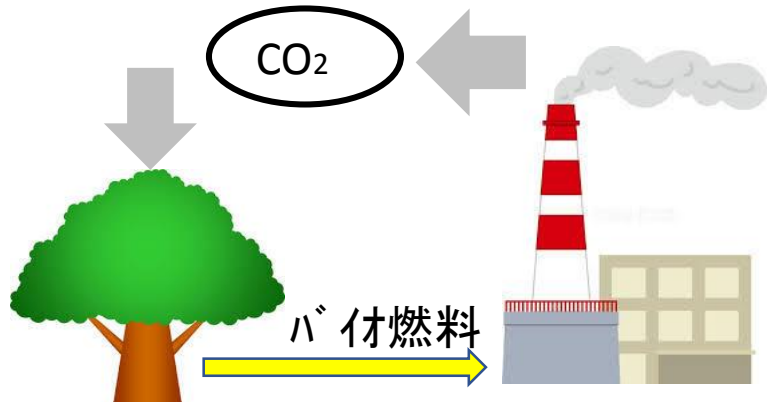
化石燃料発電+CCS(FECCS)

Positive emission



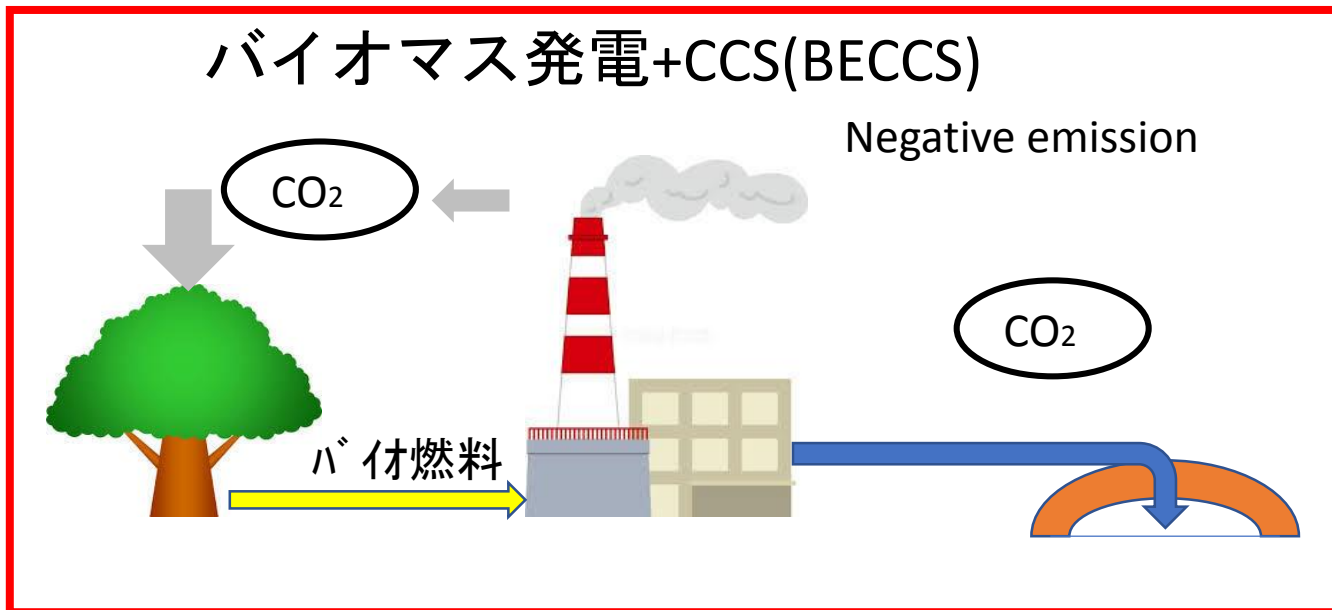
バイオマス発電

Zero emission

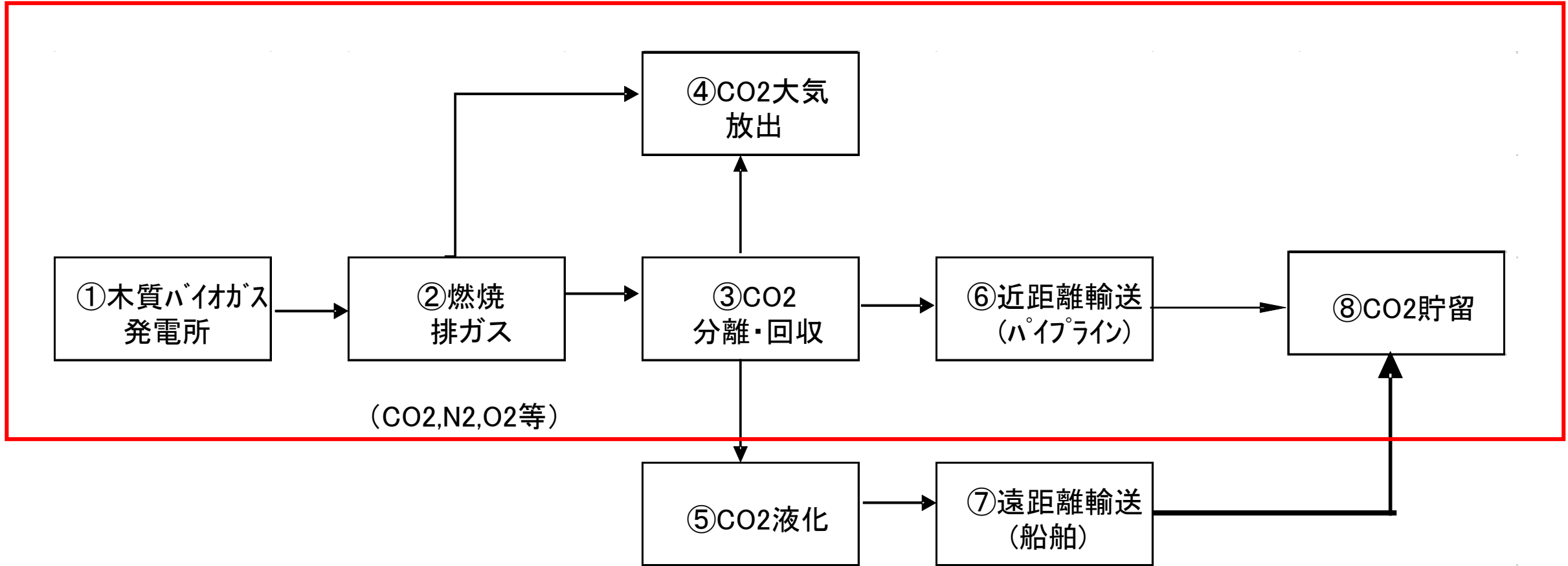


バイオマス発電+CCS(BECCS)

Negative emission



BECCSの検討プロセス



①: 10000kW

⑥: CO₂濃度90%以上の場合に適用可能

CO₂の分離回収技術

分離回収法		概要
吸収法	化学吸収法	CO ₂ を吸収液に化学反応により吸収させた後、熱エネルギーで脱離させ回収する
	物理吸収法	CO ₂ を吸収液に物理的に吸収し、減圧・加熱等をしてCO ₂ の溶解度差により回収する
吸着法		排ガスを多孔質固体である吸着剤に吸着させ、各気体の吸着力の違いを利用してCO ₂ を回収する
膜分離法	高分子膜	高分子素材に対する気体の透過速度の差を利用してCO ₂ を分離
	促進輸送膜	排ガス中のCO ₂ と可逆的・選択的に反応するキャリアと呼ばれる溶液を支持膜に含浸させた液体膜
	無機膜	多孔中における気体の分子流、表面拡散流、分子ふるい作用等を利用してCO ₂ を分離
深冷分離法		常温で気体の混合ガスを冷却し液化蒸留又は部分凝縮により単一成分に分離する方法
膜・吸収ハイブリッド法		CO ₂ を吸収液に化学反応により吸収させた後、高分子膜を介して高圧側から低圧側に脱離させ回収する

試算条件

CO2固定発生源：10000kW直接燃焼方式バイオマス発電所

CO2分離・回収法*：化学吸収法
膜-吸収ハイブリッド法

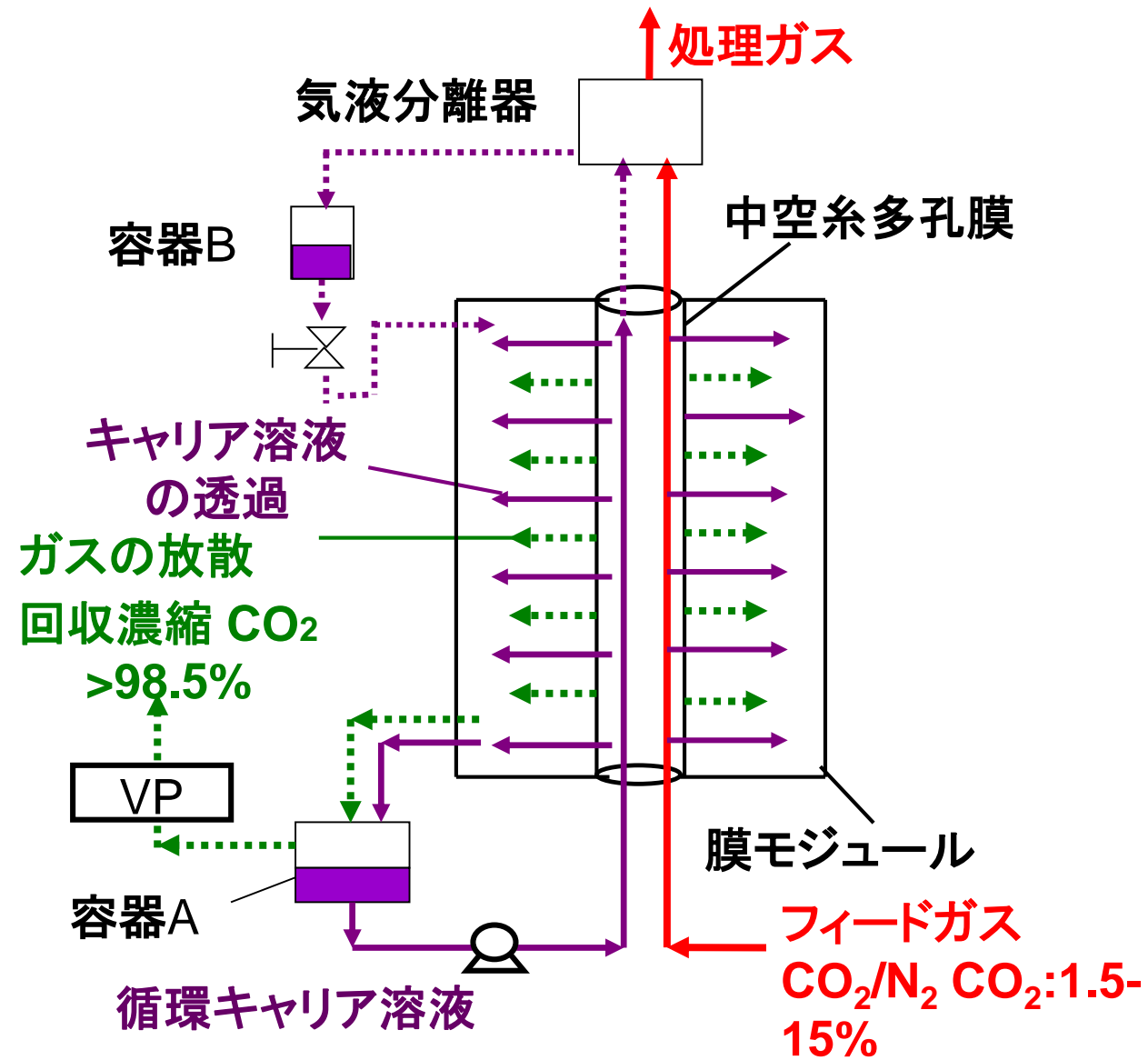
CO2分離・回収濃度：90%以上

CO2回収率：80%

CO2輸送：パイプライン(10km)

CO2貯留：地中貯留

*化学吸収法は一部実用化されている技術であり、多くの文献でも紹介されているが膜-吸収ハイブリッド法は基礎研究段階であり紹介例が少ないため次ページに概念図を示す。



膜-吸収ハイブリッド法概念図

10000kWバイオマス発電所排ガス組成

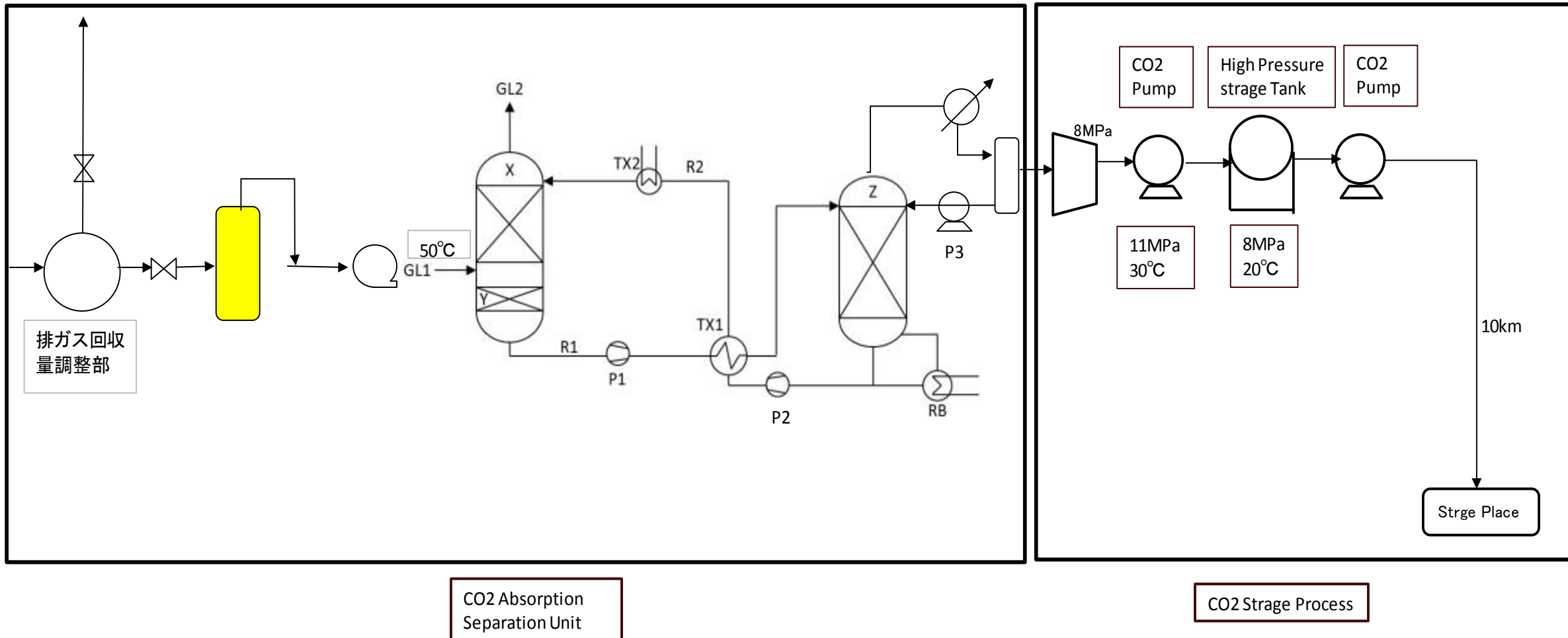
発電所排ガス 167°C	成分	組成(-)	流量(Nm ³ /h)
	CO ₂	0.122	9040.2
	N ₂	0.658	48757.8
	O ₂	0.044	3260.4
	H ₂ O	0.176	13041.6
	合計	1	74100

試算前提条件(分離部)

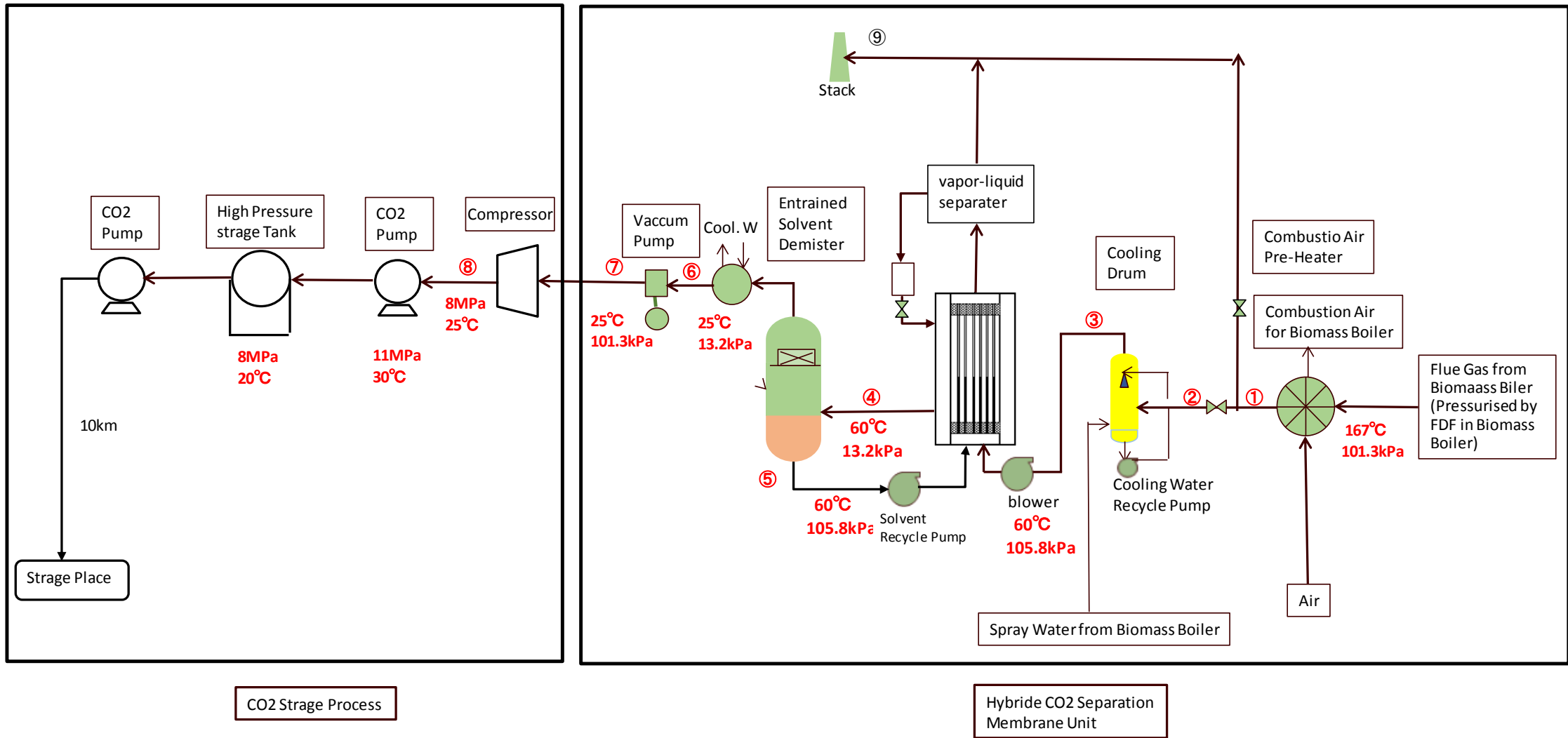
		膜-吸収ハイブリッド法	吸収法
分離部	動力	<p>・Sep.Purif.Technol. 46 (2005) 26-32及び機械工学便覧に基づく</p> <p>1.気体冷却動力(海水等常温液体): 3000000Nm³/hrの排ガスをΔ 35°C冷却するのに4900kWの動力が必要と過去にPRO2で試算した結果に準拠</p> <p>2.ブローア-動力: $WB = \frac{Pin Fe Z \gamma}{(\gamma - 1) [(Pf / Pin)(\gamma - 1) / z \gamma - 1]} / \eta B$ Pinはブローア-入口圧力(大気圧)、Feは排ガスの流量、Zは段数、γは気体の比熱比、Pfはモジュールへのガス供給圧力、ηBはブローア-効率で0.85</p> <p>3.送液動力: $WL = \frac{L \rho g \Delta h}{\eta L}$ Lは液の体積流量、ρはキャリア溶液密度、Δhはポンプヘッド(10m)、ηLは送液ポンプの効率(0.8)</p> <p>4.真空ポンプ動力: $WV = \frac{Pp Fp Z \gamma}{(\gamma - 1) [(Pe / Pp)(\gamma - 1) / z \gamma - 1]} / \eta V$ Ppはモジュールの出口圧力、Fpはモジュール透過ガス流量、Peは真空ポンプの出口圧力(大気圧)、ηVは真空ポンプ効率(0.7)</p> <p>5.真空ポンプ冷却水動力 真空ポンプの効率が100%の場合の真空ポンプ動力の5.4%</p>	<p>・低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編 CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望に基づく</p> <p>1.気体冷却動力(海水等常温液体): 3000000Nm³/hrの排ガスをΔ 35°C冷却するのに4900kWの動力が必要と過去にPRO2で試算した結果に準拠</p> <p>2.電力 23938kW</p> <p>3.スチーム 1733GJ/h</p> <p>4.熱交換機冷却水 68940t/h</p>
	コスト	<p>・化学工学論文集、31 (5) 325-330 (2005)に基づく</p> <p>動力費 12 円/kr-CO₂</p> <p>設備費用 ブローア- 11.54 億円 3000000 Nm³/hr 送液ポンプ 1.15 億円 1000 m³/min 真空ポンプ 1.2 億円 1600 Nm³/min 中空糸膜モジュール 2000 円/m² 冷却除湿ポンプ 25 億円 3000000 Nm³/hr</p> <p>固定費 設備費用の14%、 人件費 年間経費 6,000,000 円/年・人 年間労働時間 8000 時間 従業員 6 人</p>	<p>・化学工学論文集、31 (5) 325-330 (2005)に基づく</p> <p>動力費 12 円/kr-CO₂</p> <p>スチーム費 0.3円/MJ</p> <p>冷却水費 3円/t</p> <p>設備費 冷却除湿ポンプ 25 億円 3000000 Nm³/hr その他合計 65.67 億円 2900000Nm³/hr</p> <p>固定費 設備費用の14%、 人件費 年間経費 6,000,000 円/年・人 年間労働時間 8000 時間 従業員 6 人</p>

試算前提条件(貯留部)

		膜-吸収ハイブリッド法	吸収法
貯留部	動力	・低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編 CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望(Vol.2)に基づく CO2圧縮機 61000kW 725000kg/hr 送液CO2ポンプ 800kW 725000kg/hr 貯留CO2ポンプ 44kW 725000kg/hr	・低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編 CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望(Vol.2)に基づく CO2圧縮機 61000kW 725000kg/hr 送液CO2ポンプ 800kW 725000kg/hr 貯留CO2ポンプ 44kW 725000kg/hr
	コスト	・低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編 CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望(Vol.2)に基づく 動力費 12 円/kr-CO2 設備費用 CO2圧縮機 2000 百万円 725000 kg/hr CO2輸送ポンプ 3 百万円 725000 kg/hr 貯蔵タンク 15700 百万円 725000 kg/hr CO2圧入ポンプ 3.4 百万円 725000 kg/hr 輸送パイプ 820 百万円 725000 kg/hr 固定費 設備費用の14%、 人件費 年間経費 6,000,000 円/年・人 年間労働時間 8000 時間 従業員 2 人	・低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書 技術開発編 CCS(二酸化炭素回収貯留)の概要と展望(Vol.2)に基づく 動力費 12 円/kr-CO2 設備費用 CO2圧縮機 2000 百万円 725000 kg/hr CO2輸送ポンプ 3 百万円 725000 kg/hr 貯蔵タンク 15700 百万円 725000 kg/hr CO2圧入ポンプ 3.4 百万円 725000 kg/hr 輸送パイプ 820 百万円 725000 kg/hr 固定費 設備費用の14%、 人件費 年間経費 6,000,000 円/年・人 年間労働時間 8000 時間 従業員 2 人



化学吸収法 分離・貯留プロセスフロー図



膜-吸収ハイブリッド法 分離・貯留プロセスフロー図

分離・貯留コスト比較

		化学吸収法	膜-吸収ハイブリッド膜	単位
分離回収部	動力費	1.73	1.25	円/kg-CO ₂
	固定費* ¹	2.20	1.96	円/kg-CO ₂
	人件費	0.31	0.31	円/kg-CO ₂
	小計	4.24	3.52	円/kg-CO ₂
貯留部	動力費	1.02	1.02	円/kg-CO ₂
	固定費* ¹	4.15	4.15	円/kg-CO ₂
	人件費	0.11	0.11	円/kg-CO ₂
	小計	5.28	5.28	円/kg-CO ₂
分離回収・貯留合計		9.52	8.80	円/kg-CO ₂
炭素税* ²		6.00	6.00	円/kg-CO ₂
BECCS		3.52	2.80	円/kg-CO ₂

*1:固定費:設備費用の14%

*2:原晋一:化学装置 5 14 (2016)

分離コスト[3円/kg-CO₂]+輸送コスト[2円/kg-CO₂]+日本固有コスト[1円/kg-CO₂]=6円/kg-CO₂

試算結果

1. 10000kWのバイオマス発電所燃焼排ガスを膜-吸収ハイブリッド法と化学吸収法で分離回収して地中貯留する場合のBECCSコストを試算した。
その結果、化学吸収法が9.38円/kg-CO₂、膜-吸収ハイブリッド法が8.80円/kg-CO₂となり膜-吸収ハイブリッド法がCO₂1kgあたり約0.6円安くなった。
2. 貯留プロセスは「低炭素社会実現に向けた政策立案のための提案書技術開発編 CCS（二酸化炭素回収貯留）の概要と展望（Vol.2）」の報告値に基づき試算したので同じ値である。
3. 分離回収プロセスにおいて膜-吸収ハイブリッド法は吸収法と異なり吸収液中のCO₂の脱離に熱エネルギーを用いず真空ポンプを用いているのがこの差となった。
4. BECCSはカーボンニュートラルなバイオマス発電所排ガスを対象としているため、そのコストは炭素税6.0円/kg-CO₂以下にする必要があり、更なる低コスト化が必要である。ただし、今回はバイオマス発電所の燃焼排ガスの熱回収を評価せず、BECCSコストを試算したが、発電所を含めたプラント全体で考えると更なるコストの削減が可能になると考える。