

DACCSとの比較によるBECCSの意味 と、CDR技術の方向性

2022年7月19日

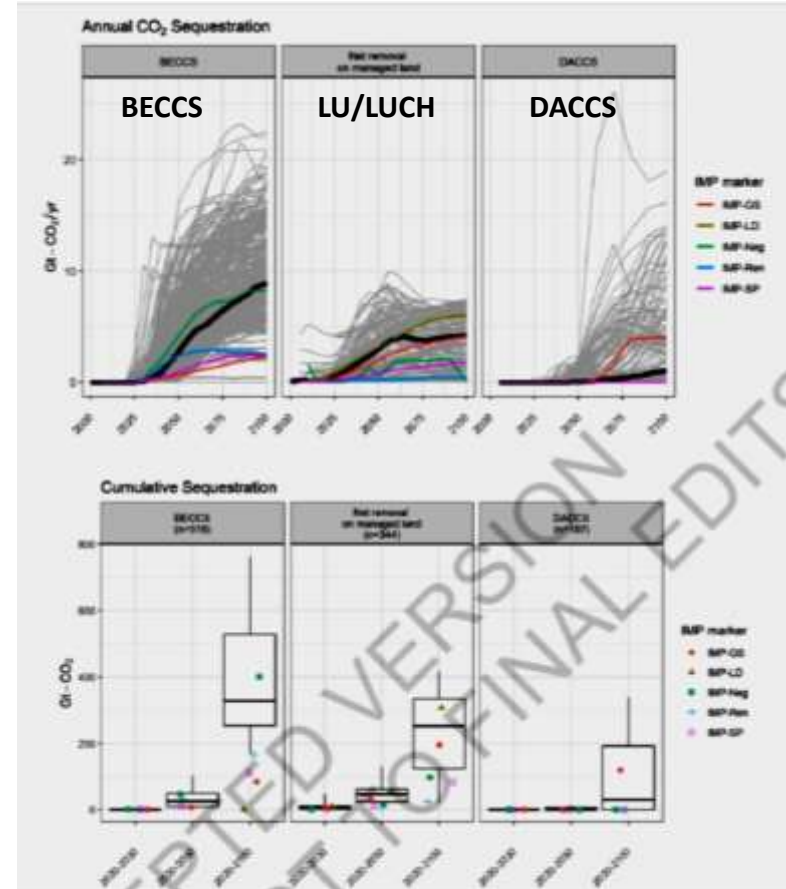
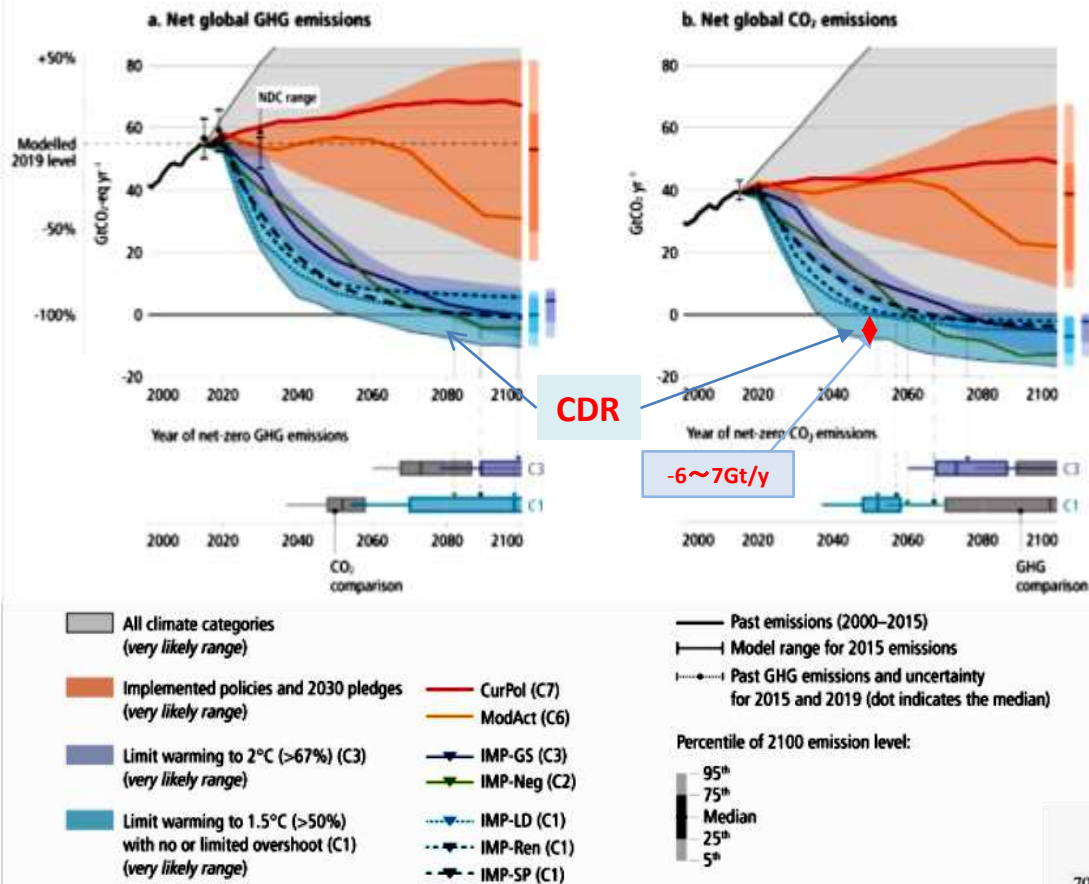
エネルギー研究会 FD

原 晋一

はじめに

- 今年4月初め公表されたIPCC AR6 WG3で、現状の政策を継続した場合の将来の気候変動の状況が非常に厳しくなるとの予測と、2040年から2050年にかけて、GHGの排出をNet-Zero以下にする必要があり、大気中のCO₂を回収し隔離する技術、CDR(Carbon Dioxide Removal)、が必要であると提言された。
- 主要なCDR技術には、BECCSとDACCSがあるが、DACCSは大気中のCO₂を大気中から回収・分離して地中等に貯蔵する方法で、400ppm程度の希薄なCO₂を含む大気の収集と、CO₂分離に工学技術を使い、多大なエネルギーを使い行うのに対し、
- BECCSはCO₂取り込みは植物(森林・樹木)に頼り、発電と同時に分離を工学的に行い、エネルギー的にはエネルギー消費の少ない技術と考えられる。
- ただ、森林樹木のCO₂吸収と、発電エネルギーの源である樹木本体の成長に関する性状は、多様な樹木や複雑な生育環境によりデータが複雑・多岐であり、BECCSの評価は誤差を伴う。
- しかし、DACCSは希薄なCO₂の取り込みに起因してコストが大幅に高いと考えられ、BECCSとの比較においては樹木データの誤差も比較への影響は小さいと考え、手に入る情報で双方のコスト比較を行い、今後の性能向上作業の方向づけを試みる。
- なお、CO₂取り込みを樹木に頼るBECCSは、DACCSに比べ土地の制限に起因する森林規模に限界があると考えられ、森林の効率的な管理運営についても検討が必要があると考えられるが、今回は検討範囲外とする。

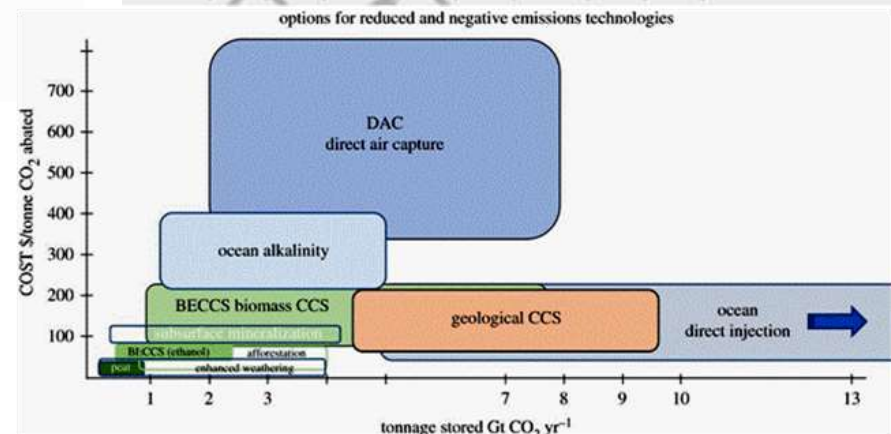
Modelled mitigation pathways that limit warming to 1.5°C, and 2°C, involve deep, rapid and sustained emissions reductions.



排出経路 記号	Pathway	2100年気温	径路記号	零排出年
IMP*-SP	Shifting Pathways	≤1.5°C, wo OS*	SP, LD	50~55 ('35~70)
-Ren	Renewable	≤1.5°C, w OS	Neg	55~60 ('45~70)
-LD	Low Demand	Likely ≤2°C	Gs	70~75
-Neg	Net Negative (CCS)	≤2°C		80~85
-GS	Gradual Strengthening Current Policy	≤2.5°C		2100~
-ModAct	Modelate Action	≤3°C	ModAct	Ditto
-CurPol	Current Policy	≤4°C	CurPol	Ditto
		≥4°C		Ditto

*: Illustrative Mitigation Pathway

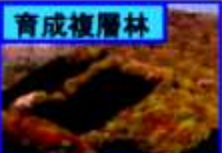
*: Over Shoot (Over Target Temp. then down to Target T.)



多様で健全な森林への誘導



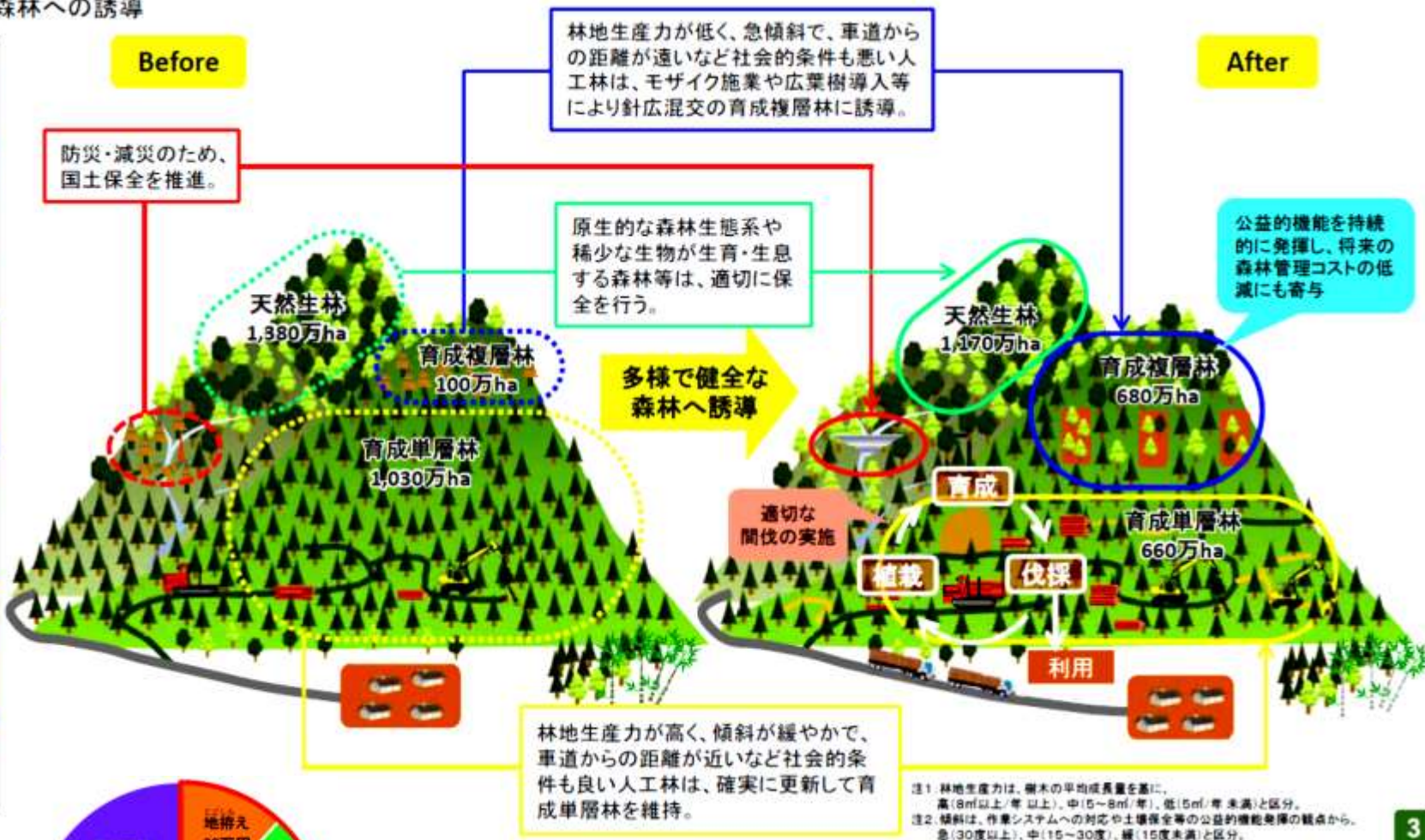
主に自然散布の種子の発芽・生育により成立・維持



樹齢・樹高が複数の森林として人為により成立・維持



樹齢・樹高が単一の森林として人為により成立・維持



造林・保育作業コスト
 初期費用: 173万円/ha
 間伐・除伐: 89万円/ha
 合計 : 262万円/ha

間伐・除伐は育林の環境維持を目的にしているものと考えられる。

本格的バイオマスボイラー原料材確保のための積極的伐採・植林を行うためには合計**300万円/ha**は必要か。

注1: H30標準単価より作成
 スギ3000本/ha植栽、下刈5回、除伐2回、
 保育間伐1回、間出間伐(50~60m3/ha)1回

森林・林業政策

「森林・林業・木材産業の現状と課題」、林野庁、2021July

森林・林業基本計画(抄)(平成28年5月24日閣議決定)

第3 森林及び林業に関し、政府が総合的かつ計画的に講ずべき施策

1 森林の有する多面的機能の発揮に関する施策

(6)地球温暖化防止策及び適応策の推進

地球温暖化の防止、低炭素社会の構築のため、間伐等の森林の適切な整備、(中略)、木材及び木質バイオマスの利用による炭素の貯蔵及び二酸化炭素の排出削減の取組を総合的に推進する。

3 林産物の供給及び利用に関する施策

(3)新たな木材需要の創出

②木質バイオマスの利用

木質バイオマスの利用に当たっては、カスケード利用を基本としつつ、製紙、パーティクルボード等の木質系材料としての利用を進めるほか、木質バイオマス発電施設における未利用間伐材等の利用、地域における熱電供給システムの構築、チップ・ペレット・薪などを燃料とする高性能のバイオマスボイラー、家庭用ストーブ等の導入・改良や普及を図る。なお、木質バイオマス発電施設等の設置に当たっては、安定的な燃料調達が可能となるよう、地方公共団体等と連携し、計画段階から、施設設置者が原木供給者と合意形成できるようにする。

注:「カスケード利用」とは、多段階での利用。木材を建材等の資材として利用した後、ボードや紙等の利用を経て、最終段階で燃料として利用することをいう。

用途区分	国産材利用量(単位:百万m ³)		
	H26年 (実績)	H32(R2)年 (目標)	H37(R7)年 (目標)
製材用材	12	15	18
パルプ・チップ 用材	5	5	6
合板用材	3	5	6
燃料材	2	6	8
その他	1	1	2
合計	24	32	40

「森林・林業基本計画」における木材利用量の目標

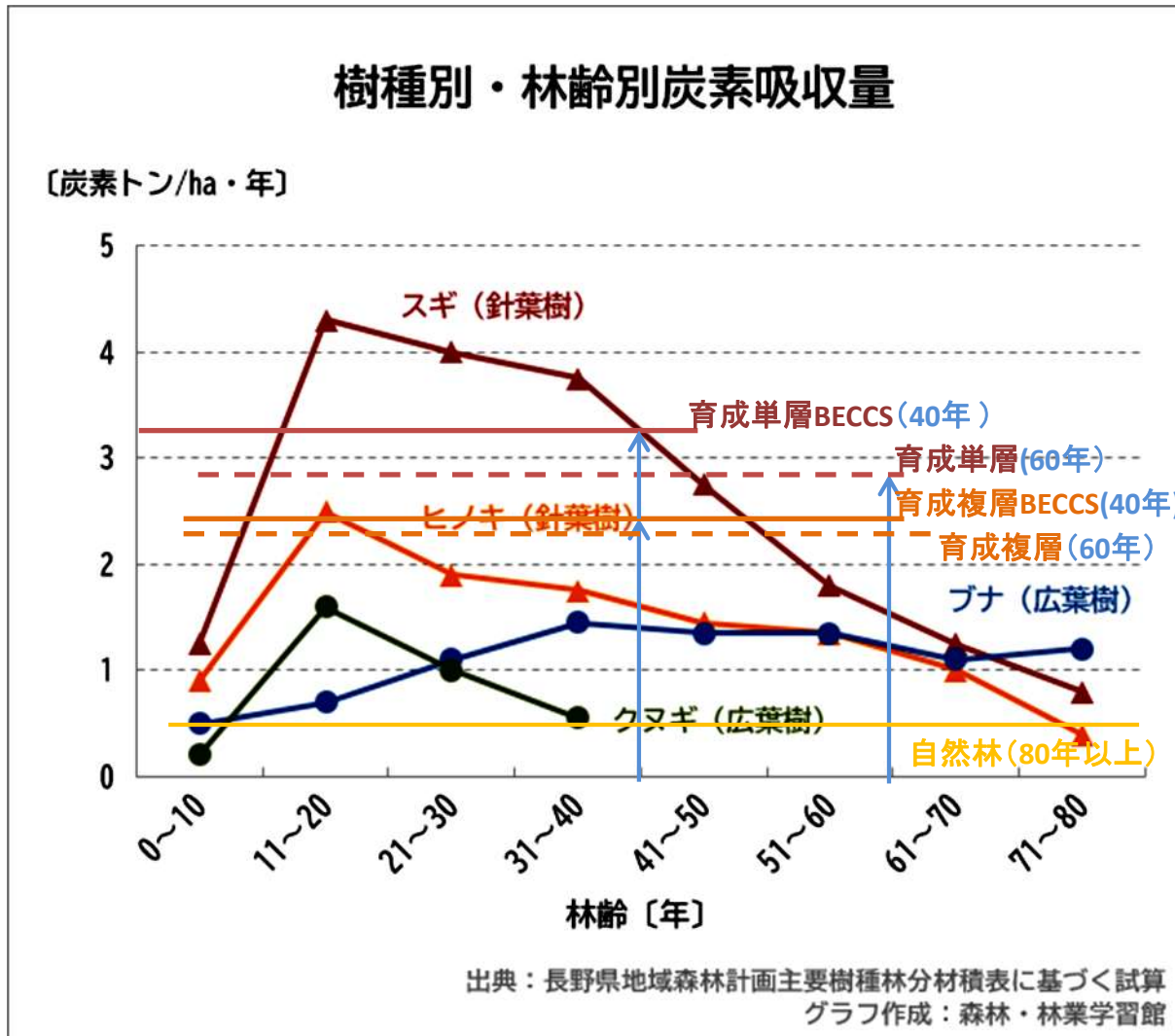
7

育成作業は植林と間伐作業がメインで製材、パルプチップに供する木材を低コストで生産することが主たる目的のようである。

燃料用には主として間伐材を充てるようである。

積極的に燃料材を提供するには、C吸収速度が速い樹木をそのC蓄積速度の減少が落ちる前(40年~60年)に毎年定期的に伐採し、再植林を図ることが有効と考えられるが、そのような視点は、窺えないが。。

森林樹木の炭素吸収、時間経過と伐採齢対応平均炭素吸収



BECCS用定期伐採林

育成単層林(スギ材)伐採の林齢と炭素吸収速度:40年、3.3 C-t/ha/y

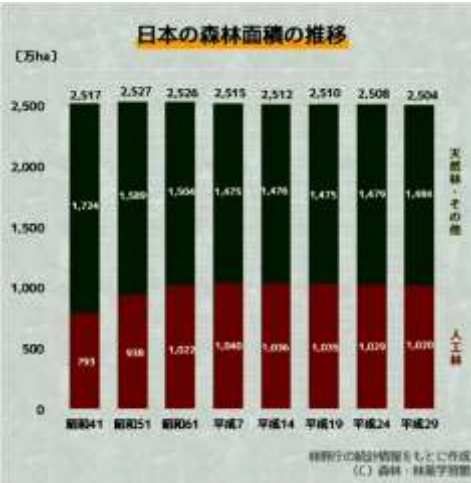
育成複層林(スギ/ヒノキ)伐採齢と炭素吸収速度:40年、2.5 C-t/ha/y

BECCS無し定期伐採

育成単層林(スギ材)伐採の林齢と炭素吸収速度:60年、2.8 C-t/ha/y

育成複層林(スギ/ヒノキ)伐採齢と炭素吸収速度:50年、2.2 C-t/ha/y

その他の森林関係のエネルギー、C固定化に関する情報



森林・林業学習館、「日本の森林面積と森林蓄積の推移」

植栽密度 (本/ha)	783	1,128	1,626	2,339	3,365	4,850	6,987
平均胸高直径 (cm)	36.5	31.4	27.6	24.0	19.7	18.4	17.9
平均樹高 (m)	21.5	20.5	20.6	19.6	17.7	16.9	17.2
平均立木材積 (m³/本)	0.99	0.74	0.60	0.44	0.28	0.24	0.24
林分材積 (m³/ha)	775	853	921	972	890	840	885
形状比平均	58.9	65.3	74.6	81.7	88.8	91.8	96.1

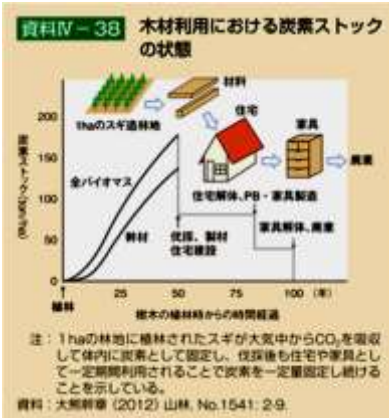
※本試験地では表中の植栽密度のほか、4つの異なる植栽密度の区分を設定。
※植栽密度の区分ごとに、当初36本ずつ植栽。
「再造林の推進」林野庁2020_Oct.

樹木性状: 密度、燃焼熱量、炭素濃度

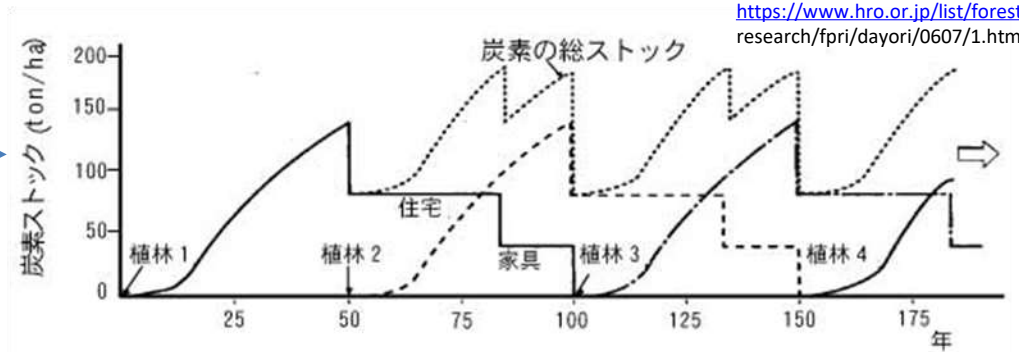
- ・密度: 0.34~0.38 (g/cc)
- ・LHV: 2500kcal/kg (水分: 30%以下)
- ・炭素濃度: 50wt% (水分: 11%)
- ・水分: 20wt% (30~10wt%)

← 以上のように、森林の平均的な発熱量や燃焼排ガス量に関わる検討において、木材性状を基にした数値を使用するのは、林分材積の値が大きく異なるので、代わりに単位面積当りC吸収量(CO2量)を基に数値換算を行い検討した。

林野庁の炭素固定のコンセプト



全国林業普及協会の林業に関わる炭素固定に関する考え方



<https://www.hro.or.jp/list/forest/research/fpri/dayori/0607/1.htm>

BECCSとDACCSに関する取扱い方

・BECCSに関しては、松宮さんの技術と赤澤さんのチップ乾燥に関する情報ベースに検討。

・DACCSに関しては、大気吸引FANの所要動力は独自に計算し、回収分離部は、MDEA溶液による吸収放散方式のLCS文献、LCS-FY2015-PP-8に基づき検討。

(BECCS Data) 真庭バイオマス発電

発電規模	10	MW
CO2発生量	0.142	mill.tCO2/y
設備費	6.6	\$mill./MW
Grid E.F.(NG:20%)	0.089	gCO2/kwh
2050年Grid Cost(NG:20%)*	11.6	円/kwh
*(原)算出、全再エネレビュー		
Boiler&Pow.Gen. コスト*	5900	円/tCO2
CO2回収単価	6.1	円/kgCO2回収

真庭バイオマス発電 HB-BECCS

Feed CO2 conc	12.2	vol %
CO2回収率	80	%
CO2貯蔵単価	3.8	円/kgCO2回収
CO2貯蔵単価	3765	円/kgCO2回収

樹木組成

C (wt%)	45
H2O (wt%)	20

チップ乾燥 40%→20% 85t処理 20日

風量	70 (m3/m2/h)
乾燥場面積	260.0 m2
Fan 動力	13.4 kW

赤澤さんプレゼン情報

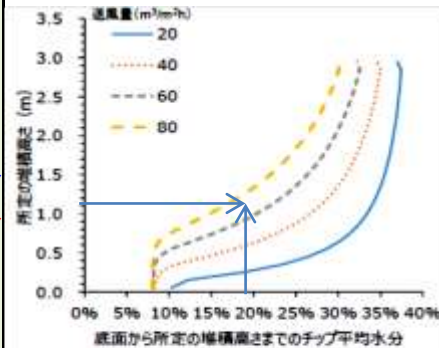


図3 種々送風量条件でチップ乾燥時のチップ平均水分と乾燥到達高さ (初期水分40%, 20日間乾燥時)

床面積: 260m², チップ収容量: 約300m³, 85t
 堆積1.2m, 水分40%時,
 システム: 雪氷と太陽熱を活用し高温低温空気を作り、堆積チップ下部より送風し、チップを乾燥

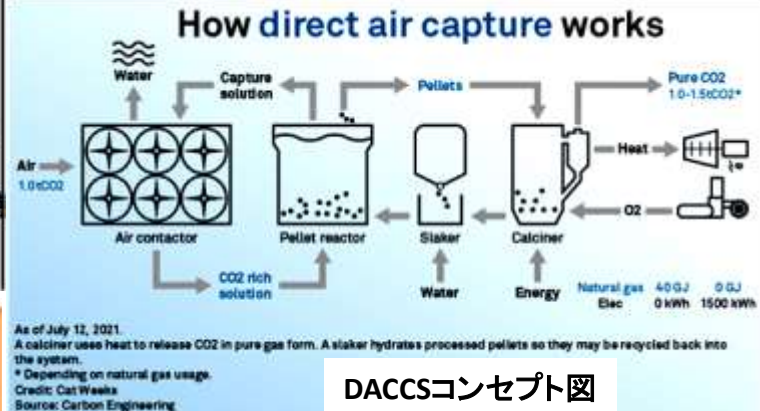
(DACCS Data)

文献コスト(低)	350 \$/tCO2回収
文献コスト(高)	800 \$/tCO2回収
https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0447	
FAN Power Eq. (Perry ChE Hand Book)	
$H_p (\text{air blower}) = ((144) * Q * (\text{ft}/\text{min}) * (P_2 - P_1 (\text{psi}))) / (33000) / \text{eff}$	
: $0.000157 * q (\text{cuft}/\text{min}) * \text{deltap} (\text{in}_\text{water}) / \text{eff}$	

MDEA吸収液・CO2分離回収コスト*

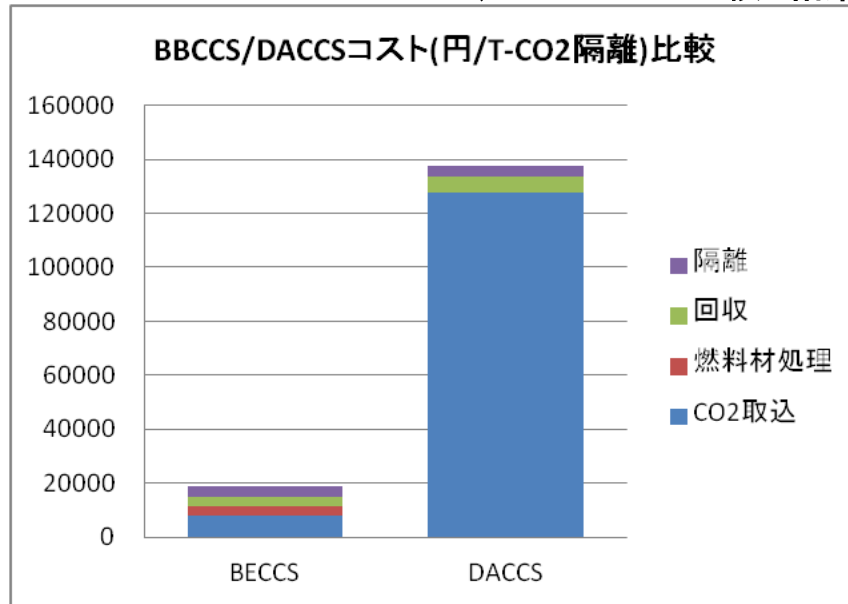
回収CO2量	674 tCO2/h
	5.39 MtCO2/y
分離回収コスト	4.1 円/kgCO2

*「CCSの概要と展望」LCS-FY2015-PP-8
 岩崎、三森、LCS 2014 March



DACCSコンセプト図

BECCS、DACCSコスト比較 結果まとめとFDテーマ



<https://www.nikkei.com/article/DGKKZO33206990Q8A720C1MY1000/>

“大気中炭酸ガス1トンを1万円で回収”

Carbon Engineering Inc., British Columbia in Canada

- BECCSの原料である木材の伐採・植林・成長管理は、DACCSでの希薄なCO2を含む大気吸引FANの役割をになっており、多大なコストを必要とするという印象がある。
- しかし、上図に示す通り、DACCSにおける大気吸引FANの動力は圧倒的に高いコストを必要とする。
- すなわち、森林面積が許す限りCDRとしては、BECCSを優先的に採用すべきである。
- しかし、森林管理コストは、バイオマス発電・排ガスCO2回収隔離コストと同程度のコストが必要である。CDRにおいては、限られた森林面積のもと樹木をより多く生産するために、森林管理の充実がキーポイントとなる。
- 尚、現状の森林管理に関する政策は、未だエネルギー資源としてではなく、木材としての利用の向上を目指したもののようを感じる。

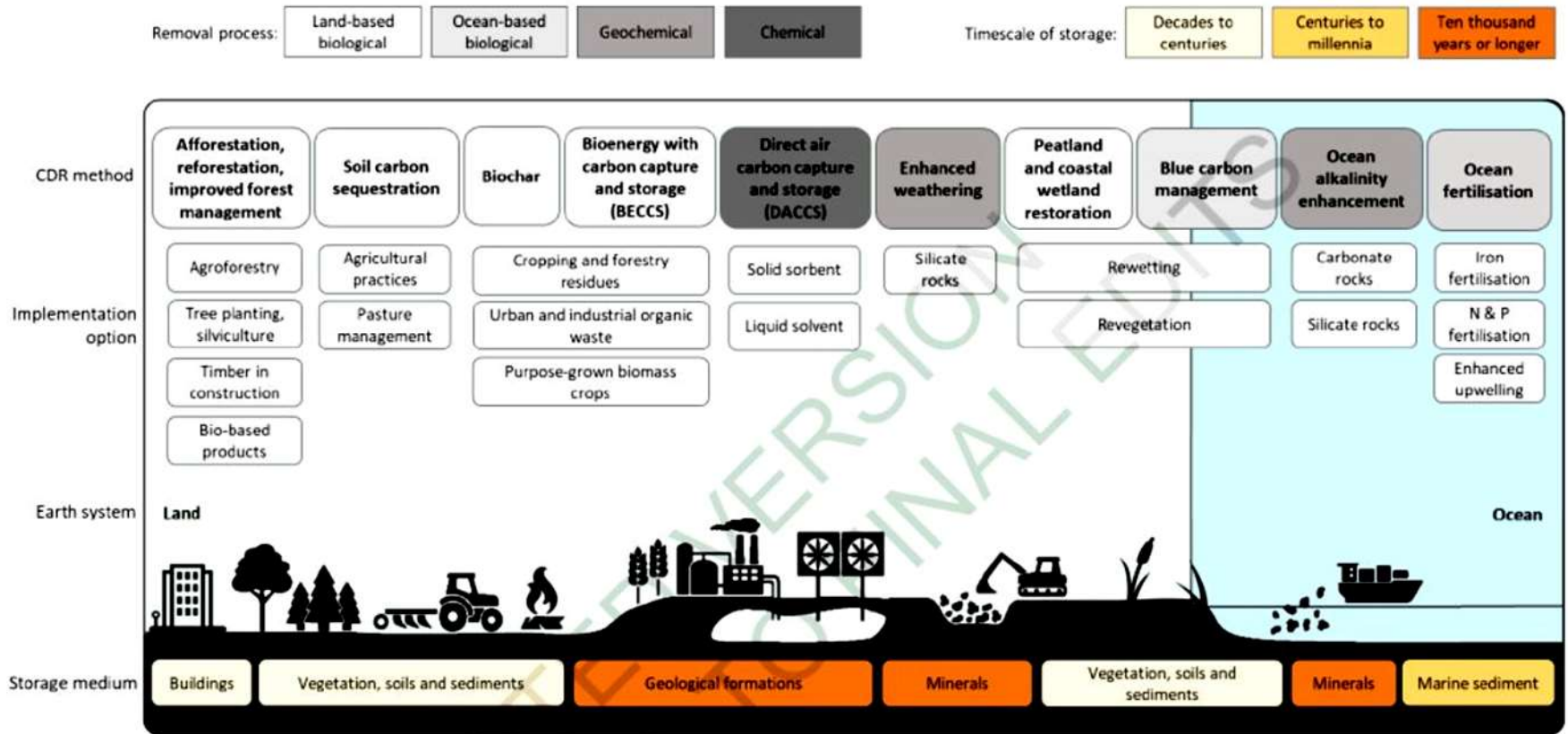
(考えられるFDテーマ)

- エネルギー資源の観点からは、水分の減少、樹幹部の採取、短期成長種の増加、その他伐採・集荷・輸送・原材前処理等の効率化、とうが改善のポイントになるのではないかな？
- バイオマスボイラーの観点からは、One Unitの大規模化、原料脱水への廃熱利用等があるのでは？
- 隔離の観点からは、CO2輸送の大量化、低コスト化がテーマとして有るのでは？
- CO2取り込みが規模を制約するBECCSの検討には、森林管理に関する情報が不可欠だが、今後当会が検討を進めるにあたり、この方面の検討はどのように進めればいいのか？
- CDRの必要量は、世界全体で2050年には6～7Gt/yとのことで、DACCSも必要であろうが、CO2取り込みは、自然に任せる方法(海洋吸収、岩石化、微生物による固定化等)を見つけるのが最も重要ではないかな？

(参考) 森林管理、BECCS、DACCS比較 Excel Sheet

		植林・間伐強化				伐採・植林強化(林齢仕化)				伐採・植林強化(林齢仕化)				Baseline	
		Baseline				+育成複層林材:BECCS				+育成単複・層林材:BECCS				+DACCS	
		育成単層林	育成複層林	天然林	合計	育成単層林	育成複層林	天然林	合計	育成単層林	育成複層林	天然林	合計		
						BECCS				BECCS					
森林	面積	10 ⁶ ha	6.6	6.8	11.7	6.6	6.8	11.7		6.6	6.8	11.7			
	樹木量	m ³ /ha	800	800	320	800	800	320		800	800	320			
	樹木密度	t/m ³	0.35	0.38	0.4	0.35	0.38	0.4		0.35	0.38	0.4			
	伐採齢	年	60	60	(80以上)	40	60	(80以上)		40	40	(80以上)			
	C吸収	tC/ha/y	2.8	2.2	0.5	3.3	2.2	0.5		3.3	2.5	0.5			
	伐採C吸収	tC/ha/y	2.8	2.2		3.2	2.2			3.2	2.4				
	CO2吸収	10 ⁶ tCO ₂ /y	67	54	21	78	54	21	153	78	61	21	160		
	対BLOCO2吸収	10 ⁶ tCO ₂ /y							11.3				18.1	DACCS対象	
	造林面積単価	百万円/ha	2.7	2.7		36.2	2.7	3	38.2	3	3		40.2	DACCSコスト≥BECCSコスト	
	年間造林費	億円/y	2970	3060		6030	4455	3400	7855	4950	5100		10050	≥植林コストの関係から	
	森林育成CCSCCO2当コスト	円/t-CO2							6407				7847	来るCO2削減技術の	
	チップ乾燥費	円/t-CO2							3430				3430	選択順位の可能性から、	
HBBECCS	原料材投入量	10 ⁶ t/y	(BECCS Data) 真庭バイオマス発電				32.7			47.2	36.8				
	原料材投入量	10 ⁶ t/y	発電規模 10 MW				34.5			46.2	51.68				
	原料材C量	10 ⁶ t/y	CO2発生量 0.142 mill.tCO ₂ /y				3.1			21.2	16.6				
	発電CO2排出	10 ⁶ tCO ₂ /y	設備費 6.6 \$mill./MW				11.3			10.2	7.9		18.1		
	BECCS回収率	%					80			80	80				
	BECCS回収量	10 ⁶ tCO ₂ /y					9.0						14.5		
	BECCS回収費用	億円/y	Grid E.F.(NG:20%) 0.089 gCO ₂ /kwh				552						887		
	BECCS回収当コスト	円/tCO ₂	2050年Grid Cost(NG:20%)* 11.6 円/kwh				6119			6119			6119		
	発電設備コスト	円/tCO ₂	*(原)算出、全再エネレビュー				5900			5900			5900		
	発電収入	円/tCO ₂	Boiler&Pow.Gen. コスト* 5900 円/tCO ₂				8161			8161			8161		
DACCS	大気CO2 conc.	volppm	CO2回収単価 6.1 円/kgCO ₂ 回収				(DACCS Data)						大気CO2 conc.	400	
	CO2回収率	%	真庭バイオマス発電 HB-BECCS				文献コスト(低) 350 \$/tCO ₂ 回収						CO2回収率	80	
	張込FAN動力	kw	Feed CO2 conc 12.2 vol %				文献コスト(高) 800 \$/tCO ₂ 回収						張込FAN動力	2887766	
	入口風速	m/sec	CO2回収率 80 %				https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0447						入口風速	20	
	差圧	mmH2O					FAN Power Eq. (Perry ChE Hand Book)						差圧	300	
	FAN入口径/基	m					Hp (air blower)=((144)*Q*(ft/min)*(P2-P1(psi)))/(33000)/eff						FAN入口径/基	5	
	Efficiency	%	CO2貯蔵単価 3.8 円/kgCO ₂ 回収				: 0.000157*q(cuft/min)*deltap(in_water)/eff						Efficiency	80	
	基数	FANs	CO2貯蔵単価 3765 円/kgCO ₂ 回収				MDEA吸収液・CO2分離回収コスト*						基数	2039	
	Air取込量/基	Nm ³ /h	樹木組成 C (wt%) 45				回収CO2量 674 tCO ₂ /h						Air取込量/基	1413000	
	CO2取込量	10 ⁶ tCO ₂ /y	H2O (wt%) 20				5.39 MtCO ₂ /y						CO2量取込量	18.1	
	Air取込量	10 ⁶ Nm ³ /h	チップ乾燥 40%→20% 85t処理 20日				分離回収コスト 4.1 円/kgCO ₂						Air取込量	2881	
	電力コスト	円/kwh	風量 70 (m ³ /m ² /h)				*「CCSの概要と展望」LCS-FY2015-PP-8						電力コスト	12	
	FAN電力費	億円/y	乾燥場面積 260.0 m ²				岩崎、三森、LCS 2014 March						FAN電力費	2678	
	FAN電力単価	億円/tCO ₂	Fan 動力 13.4 kW										FAN電力単価	18487	
	FAN動力CCSCCO2当コスト	円/t-CO2											FAN動力CCSCCO2当コ.	127606	
	分離回収コスト	円/t-CO2											分離回収コスト	6150	
	低濃度係数	—											回収部低濃度係数	1.50	
	貯蔵コスト	円/t-CO2					3765						貯蔵コスト	3765	
	育林含み合計コスト	円/t-CO2					17460						*FAN動力のみ	137520	
育林全量ケースBECCS	MtCO ₂ /y						43.2						110.9		
世界森林CO2吸収量	7.6	GT/y	1.5°C以下、2050年CDR必要量(IPCC AR6 WG3)				7				GT-CO ₂ /y				

CDRのコンセプト図



Cross-Chapter Box 8, Figure 1: Carbon Dioxide Removal taxonomy.

Methods are categorised based on removal process (grey shades) and storage medium (for which timescales of storage are given, yellow/brown shades). Main implementation options are included for each CDR method. Note that specific land-based implementation options can be associated with several CDR methods,

灰色: プロセス
 黄色と橙色: 貯蔵(貯蔵可能期間表示)
 白色: 土地利用(植林、土壌等)