

森林與木材對二氧化碳涵存之貢獻

文 ■ 王松永 ■ 台大森林環境暨資源學系教授

一、森林在防止溫暖化之功能

植物藉由光合成吸收大氣中之二氧化碳，並排出氧氣。草本植物多數為單年生，其所吸收之碳素，在當年就會被排出，但樹木為多年生，其會經過數十年，甚至數百年之長期間繼續吸收CO₂，將碳素蓄積在樹體內。另外，森林土壤亦會蓄積許多的碳素。

世界之森林之生物量約為5,000億公噸，而森林土壤亦會蓄積2兆公噸之碳素（IPCC，2000）。引起溫暖化在大氣中之碳素約為7,600億公噸，森林之碳素量是較其還多。即燃燒石化燃料與生產水泥所引起碳素排出量為63億公噸，而相對的，藉著生物量進行碳素吸收量為7億公噸，海洋所進行碳素吸收量為23億公噸，因此碳素排出量會超過吸收量。

因森林具有吸收CO₂並加以蓄積之機能，又在地球上存在量為最大，所以森林具有調解大氣中CO₂量的機能，可承擔防止地球溫暖化之功能。

二、防止溫暖化對策之森林經營

現實上，森林是不能單純的視為CO₂吸

收源。為何如此呢？森林會依其狀態或處理方法之不同，有可能成為吸收源，亦有可能成為排出源。例如，壯齡林生長旺盛，會大量的吸收CO₂，但天然林（原生林）或極相林等過熟之森林，則森林整體來說，吸收與排出大概會相等。另外，森林之伐採會經由其後木材之利用，而與CO₂之排出相關聯，森林火災是在當時就會排出CO₂。但是，這些情況亦會藉由造林，恢復森林時亦會將所排出部分再加以吸收，兩者加減等於零。結果，最成問題者是森林的減少。不僅森林之伐採所造成之排出，今後之吸收、蓄積亦會消失掉。

為充分發揮防止溫暖化之功能，森林之適當的處理是必要的，因此，首先抑制森林之減少，森林伐採後，進行造林促使其回復，更進一步的增加森林之面積或蓄積是必要的。

但是，疏伐等育林措施並不一定會促進林分整體之生長，但為維持建造成具有下層植生之健全森林，是不可缺少者，經由此措施被認為是與防止溫暖化相關聯。



三、防止溫暖化策略之木材的功能

地球上會成為森林之土地或數量是有其上限，森林之吸收、貯藏亦各有其限界。對森林之過大的期待是不可以的。防止溫暖化之對策，首先是減少石化燃料之使用，此時木材之功能，有次述三項。

(一) 碳素貯藏效果

木材是樹木在生長之際，將吸收之CO₂加以貯藏而成者。即樹木在生合成一公噸碳水化合物，需自大氣中吸入1.6公噸CO₂，並釋放出1.2公噸O₂。因此提供社會利用之木材的貯藏量增加之場合，實質上可考慮為可將大氣中之CO₂加以削減。又在木材內貯藏之

碳素會在木材廢棄燒卻時排出至大氣中，但是這些碳素本來就存在於大氣中，而被樹木所吸收者，既使被排出至大氣中亦不會再使CO₂濃度上昇（Carbon neutral，碳中立）。所以將木材當作建材，建造木質建築物，或家具材料使用時，則在其生命週期間（約40年）均可將碳素貯藏在建築物內。如日本已累積3,800萬棟木質建築物，其所貯藏碳素量約1.4億公噸，此相當於日本全國森林所貯藏碳素量7.84億公噸之18%，這些木質建築物可視為是一座都市森林。

(二) 省能源效果

所有的材料從資材之採取、加工，以致

表1 各種材料製造時消耗之能源及碳素排放量

材料種類	石化燃燒 MJ/kg	源能消費量 MJ/m ³	製造時碳素排放量		淨碳素貯存量 kg/m ³
			kg/t	kg/m ³	
天然乾燥材 密度500kg/m ³ 筭	1.5	750	30	15	-235
防腐脲理材	1.8	900	36	18	-232
人工乾燥材 密度500kg/m ³ 筭	2.8	1,390	56	28	-222
合板 密度550kg/m ³ 筭	12	6,000	218	120	-155
集成材 密度500kg/m ³ 筭		4,500		82	-168
粒片板 密度650kg/m ³ 筭	20	10,000	308	200	-125
結構膠材		448,000		8,132	8,117
膠材	35	266,000	700	5,320	5,320
鋁	435	1,100,000	8,700	22,000	22,000
混凝土	2.0	4,800	50	120	120
膠筋混凝土		7,300		182	182
淨碳素貯存量 質製造時碳素排放量 - 材料之碳素貯存量					

註 木材之構成元素為50%碳、43%氧、6%氫、其他1%為20多種元素，因此密度500kg/m³之木材，其中一半為碳素，即會貯存250kg/m³之碳素，所以人工乾燥木材之淨碳素貯存量为-222kg/m³。

於使用均需消費能源，木材亦不例外，製造加工需消耗石化燃料，進而會排放CO₂，造成大氣中溫室氣體濃度上昇。當將木質與其他材料製造時，所消費能源比較時，如表1所示。木質材料雖然隨加工層次之增加，所消費能源亦會增加，但其比鋼材或鋁材等素材在製造需耗大量能源者，低甚多。因此如使用這些低耗能之木質材料時，其差額即有減少使用石化燃料的效果。

(三) 石化燃料之替代效果

根據上述碳素中立之想法，木材當作燃料使用時，所造成碳素排出，可視為零。而石化燃料之利用則可視為將原來在地底深處之碳素挖出，再排放至大氣中之行為，其可使大氣中之CO₂濃度上昇。單純比較木材與燃料油燃燒所排出之CO₂時，1公噸木材熱值相當於229kg燃料油，燃燒1公噸木材會排出65.2kg CO₂，而燃燒229kg燃料油則會排出1005.1kg CO₂，木材燃燒所排出CO₂只為燃料油（石化燃料）之6.5%而已。因此歐盟（EU）對於可再生能源之預估，在1995年消費生質能源44.8百萬公噸，至2010年將增至135百萬公噸，約會增加3倍，是值得重視的課題（王松永，2003）。因此利用木材等生質能源取代石化燃料結果，可將因消費石化燃料所造成CO₂排出量加以削減之效果。

如上述，木材利用在地球溫暖化具有防止效果已很明白，木材利用之促進在地球環境時代已是急迫的課題。但在京都議定書至今為止，木材利用尚非其評價對象。但是在第二約束期間（2013~2017年）伐採木材製

品有可能成為評價之對象，預定從2005年進行探討。

依IPCC第三次報告書，以生物緩和地球溫暖化之策略有（1）既有碳匯之保全，（2）碳匯之規模擴大以造成隔離，（3）以生物起源製品替代石化燃料。這些是期待可透過（1）項可使森林與木材之既有碳匯之排出削減，藉由（2）項發揮碳匯之貯藏機能，並增加碳素蓄積量，藉由（3）項之省能源效果，替代效果等可達到減少從石化燃料之排出。

四、京都議定書之對策

(一) 京都議定書

1997年在京都召開之氣候變化綱要條約之第三次締約國會議（COP3），決議表示溫室氣體削減目標之議定書。此稱為京都議定書，其要點如次：

- (1) 對象之溫室氣體有CO₂、CH₄、N₂O，替代flon gas（HFC，PFC，SF₆）之六種。
- (2) 削減之基準年為1990年，約束期間為2008年至2012年之5年期間。
- (3) 附屬書1國之排出削減目標如次，歐盟：-8%，美國：-7%，日本、加拿大：-6%，紐西蘭、俄國：0%等。
- (4) 3條3項規定在1990年以後之新規造林，再造林、森林減少，3條4項規定1990年以後之追加的人為活動為限，由森林等引起的吸收量，可自排出量中削減掉。
- (5) 綠色開發機制（CDM），共同實施減量



(Activities Implemented Jointly ; AIJ), 排放權交易 (ET) 等利用市場經濟機制, 以削減溫室效果之計畫已被導入。

(二) 馬拉喀什協定 (Marrakech Accords)

京都議定書, 在2001年之COP7, 已歸納出京都議定書之運用相關的共識。此稱為馬拉喀什協定。其3條3項, 3條4項等, 有關森林吸收源之處理之具體性已提高。

- (1) 在3條3項活動之新規造林 (afforestation) 是指 [50年以上森林以外土地利用之造林], 再造林是指 [森林伐採後, 一旦經由其他之土地利用後, 再造林者], 森林減少是指 [森林伐採後, 作為其他之土地利用者]。又一般新規造林, 再造林歸納為AR, 森林減少略稱為D。
- (2) 3條4項活動是指森林經營, 植生回復, 農地管理, 牧草地管理等四種人為的活動, 可選擇任何之一, 或是選擇全部。森林經營一般略稱為FM。
- (3) 森林經營是定義為「能滿足森林之有關生態 (包含生物多樣性), 經濟的, 社會的機能之永續性的方法為目標, 森林所存在土地之經營與利用相關之一連串行為。」
- (4) 在1990年1月1日以後, 進行森林經營之森林, 其吸收量全體可計算在內。
- (5) 對於各國設有森林吸收量之適用上限值, 日本是每年為1,300萬公噸碳素。此數值相當於日本在1990年排放量之3.9%。日本全國在1990年所排放碳素量為

33333.33萬公噸, 而台灣在1990年所排放碳素量為4138.88萬公噸, 日本為台灣之8倍, 如依此比例計算, 台灣森林吸收量之適用上限值約為160萬公噸碳素。

台灣為確保此森林吸收量之適用上限值, 林地之木材蓄積量應為多少? 依IPCC資料, 每 1m^3 木材蓄積量可固定0.26公噸碳素, 因此每年需有615萬 m^3 木材蓄積量, 而依現在通過之國土復育方案暨行動計畫, 在海拔1,500m以下可供經營之人工林面積, 約有20萬公頃計算, 則每公頃每年木材蓄積量需達 30.8m^3 。但依現有資料, 每年每公頃林木生長量似乎較此低甚多。依環保署估計我國每減少一公噸 CO_2 的成本約為400美元, 而種樹一公頃可減少37公噸 CO_2 排放量, 因此透過造林機制對 CO_2 排放量減低是有效果的。

(6) 森林之吸收量之計算方法如次述

首先, 對於3條4項對象森林是從生長所

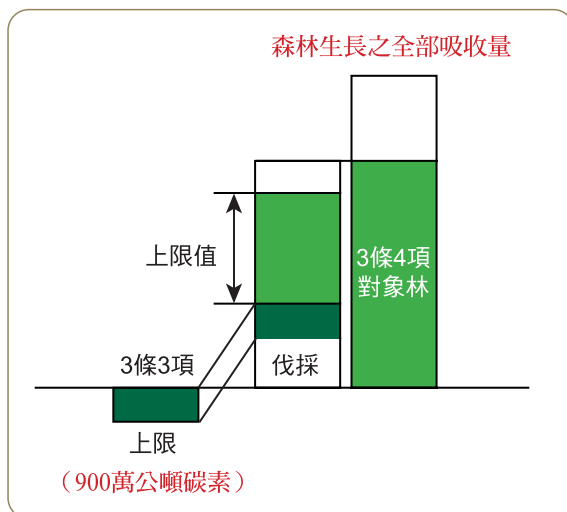


圖1 依3條4項所計算出森林吸收量 (文獻4)

引起吸收量減去因伐採等所造成之排出量，以計算出3條4項之森林吸收量。其次，在3條3項如成為排出時，由3條4項所引起吸收量是以900萬公噸（碳素）/年為上限，可相抵。在此所殘留吸收量是適用可能之吸收量。但這些如超過上限值時，其上限值會被適用。如圖1所示。

(7) 在CDM（綠色開發機制）是只有新規造林、再造林（AR）相關之森林吸收量，可計算進來者，以1990年之排出量之1%作為利用之上限。因此，森林經營（FM）所引起吸收量是不適用的。

(三) 日本之對應

接受馬拉喀什協定，日本政府修訂「地球溫暖化對策推進大綱」，為達成該國之削減目標，森林之吸收量以能確保1,300萬公噸碳素（其為基準年排出量之3.9%）為目標。依此大綱，農林水產省策定「防止地球溫暖化森林吸收源10年之對策」如表2。

本表如從3條3項之設想時，其是以擴大新規造林、再造林與降低森林之減少為基

表2 地球溫暖化森林吸收源10年對策的概要
(日本農林水產省2002)

<p>基本的想法</p> <p>根據森林、林業基本計畫之同時確在地球溫暖化對策推進大綱下確與其必要相對應的確依照對策、施策進行重新評估確在各階段對於其進步狀況進行評價確重新評估以確保達成目標之必要吸收量為目的。</p>
<p>具體的對策</p> <p>(1) 健全之森林的整備 (2) 保安林等之適當的管理、保全等之推進 (3) 木材、木質能源利用之推進 (4) 國民參加之森林建造等之推進 (5) 吸收量之報告、驗證體制之強化</p>

本。依馬拉喀什協定所表示之定義時，在日本新規造林、再造林之對象地是幾乎沒有。因此，其是活用3條4項之森林經營，在1990年以後會進行森林經營活動之森林的確保是必要的。具體來說，對於1990年以後未施以適當整備、保全之森林，被要求進行伐採、更新，除間伐、切蔓、修枝等森林整備之適當的推進。

在此，10年對策之具體的措施之中，(1) 健全森林之整備，與(2) 保安林等適當的管理、保全等之推進，如此可說會與3條4項之確保森林經營對象林可直接結合起來。

另外，(3) 木材及木質能源利用之推進是透過木材利用之推進結果有波及森林整備之效果，與發揮木材之貯藏效果，省能源效果，替代效果達成排出量削減之目的者。(4) 國民參加之森林建造等之推進，是使國民理解溫暖化對策與吸收量確保為目的。

(四) 木材之評價

木材雖具有防止溫暖化之功能，但包含2004年GPG在內，現行IPCC仍是根據當森林伐採時，CO₂即已排出的想法，因此，木材之碳素貯藏機能並非是評價的對象。此方法有必要改善之意見在國際上已提高，朝向第二約束期間（2013~2017年）伐採木材所引起CO₂吸排出之計算方法已開始被檢討。

在現在，有關伐採木材已有四種計算方法（Approach）被提案，即現行法（IPCC Default法），蓄積變化法，生產法，大氣流動法。尤其木材之輸出國、輸入國之立場不同，有利、不利會有很大變化，但會向何種



方向集中，尚不能預測之狀態。但是，京都議定書對於木材之碳素貯藏效果是不加以評價之意圖，而是以省能源效果，替代效果會削減排出之形式，明確的加以評價。

現在有關被提案之計算方法，就木材之輸出入，依據UNFCCC（聯合國氣候變化綱要公約 United Nations Framework Convention on Climate Change）之報告（UNFCCC 2003）簡單的說明：

1. 現行法（IPCC Default法）

被稱為IPCC Default法之現行伐採木材之計算方法，再三的被稱為「伐採，即排出」者，所以被伐採成為木材製品之階段，碳素即已被排出的加以計算者。以具體的計算式加以確認時，GPG是由於生物量（Biomass）生長所引起碳素增加量可以次式表示

$$\Delta C_{LB} = (\Delta C_G - \Delta C_L)$$

上式， ΔC_G ：Biomass之生長所引起碳素增加量（t-c / yr）， ΔC_L ：Biomass之損失所引起碳素減少量（t-c / yr），Biomass損失量是包含伐採等之人為攪亂與自然攪亂

之兩者。此式會明確的表示IPCC Default法之性質。依此方法，木材之生產、輸出國會被評價成排出量會較大。

2. 蓄積變化法（Stock Change approach）

取在兩時間點之伐採木材所引起碳素蓄積量之差，將此變化量作為碳素之吸、排出量的方法。此變化量是考慮包含伐採木材之生產或輸入所引起吸收與腐朽、燃燒或輸出所引起之排出。依此方法輸入國之吸收量會被評價成為較大，如圖2。

3. 生產法（Production approach）

此方法是注意在國內生產之伐採木材，將該年間之生產量與腐朽、燃燒之差作為吸、排出量者。在輸入國輸入木材是不會成為評價之對象，因此木材輸出國之吸收量會被評價成為較大。國內木材生產及木材利用之增加會直接與吸收量增加相關聯，如圖3。

4. 大氣流動法（Atmospheric flow approach）

此方法是注意森林及伐採木材之匯與大氣之間，碳素之交換的方法，伐採木材只評價腐朽、燃燒所引起之排出者。在木材輸入國排出量會被評價成為較大，圖4。

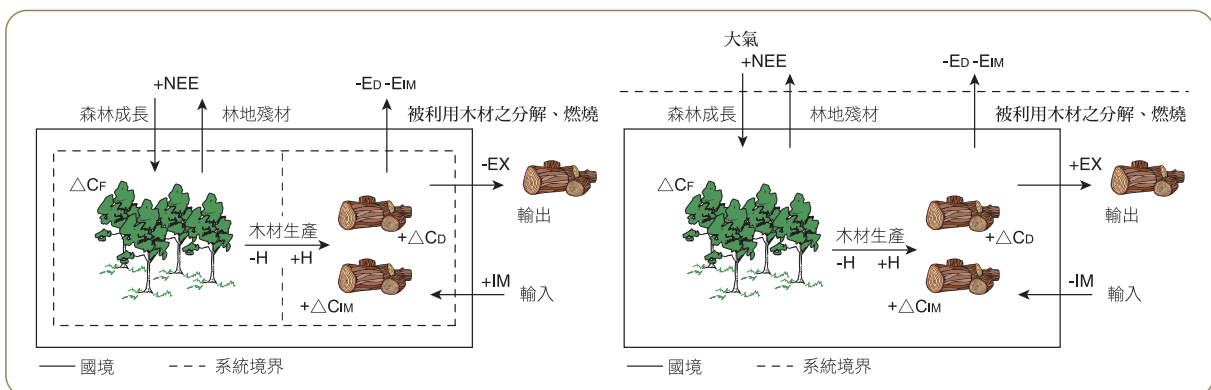


圖2 蓄積變化法之圖解（文獻4）

圖3 生產法之圖解（文獻4）

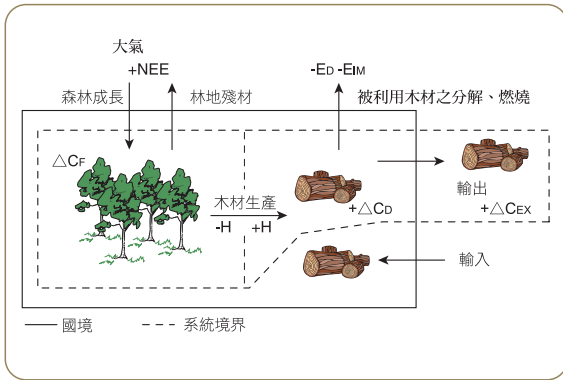


圖4 大氣流動法之圖解 (文獻4)

五、木材利用對於防止地球溫暖化效果如何評價

在此就前述之三種效果之中，有關「碳素貯藏效果」及「省能源效果」，如何進行定量評價加以敘述

(一) 碳素貯藏效果的評價方法

木材之主要元素組成不管何種樹種是大概會顯示一定範圍，碳素(C)是約為50%，43%為氧，6%為氫，1%為其他20幾種微量元素。

依此，在木材中所貯藏的碳素(除水分外)可說是木材實質之重量的50%。即在某種用途被使用木材之量如能得到體積基礎時，該木材中之碳素量可由次式計算出

$$[\text{木材材積 (m}^3)] \times [\text{絕乾密度 (t/m}^3)] \times [\text{單位絕乾重量之碳素貯藏量 0.5 (t-c/t)}]$$

問題是木製品所使用木材量，即木材貯藏量定量的推估是較困難。依木材之主要用途有「建築」、「家具、建具」、「墊板、包裝」、「土木」等物理加工利用型式，另外，化學加工型式，如製漿、造紙等。而依日本

因其木質建築市場相當發達，所以建築佔木材利用之68%。

建築物之新建及拆除量之差，可求出建築物之現存量(建築物累積貯存面積)，此透過建築統計調查，求出建築物現存面積，再乘上建築物地板面積每 1 m^2 之木材使用量(木材使用原單位)就可得到建築物內木材貯存量。依日本之「建設資材、勞動力需求實態調查」報告指出，建築物之木材投入量原單位，木造為 $0.204\text{ m}^3/\text{m}^2$ ，非木造為 $0.026\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。但，此係新建時所投入之木材量，實際上在建築物所貯藏的木材量約為其之85~90%，即木造為 $0.173\text{ m}^3/\text{m}^2 \sim 0.184\text{ m}^3/\text{m}^2$ ，非木造為 $0.022\text{ m}^3/\text{m}^2 \sim 0.023\text{ m}^3/\text{m}^2$ 。由上述將各種數值估計結果，建築物所使用木材之碳素貯藏量可由次式加以評價出。

$$\{\text{建築現存面積 (m}^2)\} \times \{\text{木材使用量原單位 (m}^3/\text{m}^2)\} \times \{\text{絕乾密度 (t/m}^3)\} \times \{\text{單位絕乾重量碳素貯藏量 0.5 (t-c/t)}\}$$

上述如能正確的推算建築現存面積，建築物所使用木材之樹種知道時，就能精度很高的評估出建築物因使用木材所貯存的碳素量。

台灣現階段木質建築物現存量尚不及全部建築物之1%，但在建築主管機構為因應京都議定書之溫室氣體減量而推動「綠建築」策略，今後木質建築勢必會增加，隨之在建築物所使用木材量勢必會增多，此對於碳素貯藏將會有正面的貢獻。



(二) 省能源效果之評價方法

省能源效果評價時，只有對於各種木製品之加工所需能源量進行評價。此係生命週期評價（LCA）的想法是有用的。本來LCA是就製品在生命週期對於環境影響的綜合評價的手段（tool），而製品之加工能源之調查只是LCA之步驟之一部分而已。

LCA是「製品所使用資源或能源，與製品之排出對於環境之負荷，從開始至最終，進行定量的推測、評價之方法」。並非只對單一要素，而是從製品產生至廢棄為止綜合的進行探討是必要的。

六、木材利用對防止地球溫暖化之效果有多少睫

在此根據京都議定書，木材之碳素貯藏效果有可能成為第二約束期間以後之評價對象，就在建築木材利用之碳素貯藏效果，將來之推估例子介紹於次：

有關伐採木材製品之利用所引起碳素貯藏效果之評價方法，與現狀之森林伐採即視為排出之Default法相對的，依IPCC已經有蓄積變化法、生產法、大氣流動法等三種方法被提案。蓄積變化法是在國內就木製品之增減所引起碳素吸收、排出量進行評價之方法。生產法是我國之森林所生產之木製品之增減進行評價。大氣流動法是不計算木材產品之輸出入，而是計算實質上被非出在我國上空之大氣中之碳素量的方法。假使木製品會成為評價之對象，而何種方法會被採用尚不明白，以下之推估例是依三種方法，比

較日本之評價值，會有何不同。

估計是依下述所作成模型進行的。在某年 n 年計算出在建築所投入木材量，那些木材從第二年後殘存率會以函數表示時，即為 $n+1$ 年、 $n+2$ 年……，而在 x 年之投入亦會以同樣的函數殘存之殘存率而殘存下來，（殘留下殘存量而被廢棄）時，在 x 年之木材貯存量是從 n 年至 x 年所投入木材之中之殘存量的總計。如此，計算出在建築每年之木材貯存量，將其換算成碳素量，以評價在建築、伐採木材製品之利用所引起碳素之吸收、排出量。另外，為計算出在2013年以後之吸收、排出量作下述之假設。（1）2003年以後之建築總貯存量為一定，因此2003年以後之建築開工量是等於前年之解體量。（2）2003年以後開工之建築物的木造率（木質建築佔全體建築之百分率）為35%（現狀），50%，70%（三層樓以下之建築物全部為木質建築）。（3）各種木製品佔國內森林之木材（國產材）的比例，維持現狀之製材為50%，合板為1%，木質板材為20%。

圖5表示在2003年以後之開工之木造率為35%時，碳素吸收、排出量的變化。如採用大氣流動法時，日本之評價值會成為很大之負值。由圖5，即使採用蓄積變化法，保持現狀之木造率，木材利用所得到碳素吸收也是無法期待。圖6表示在2003年以後之開工之木造率各為35%，50%，70%時，在第二約束期間，每年平均碳素吸收、排出量。當木造率以最大限之70%時，以蓄積變化法，或生產法計算時，各可估算出約有300萬公噸

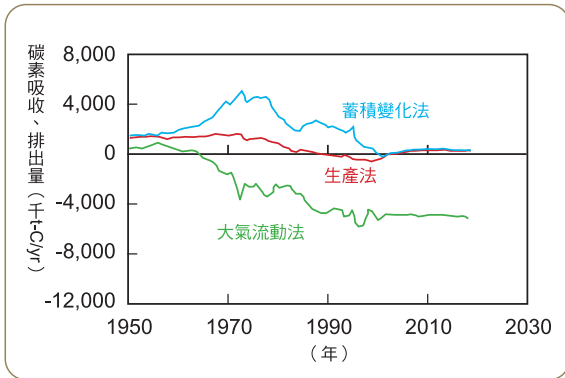


圖5 碳素吸收、排出量之推移 (文獻5)

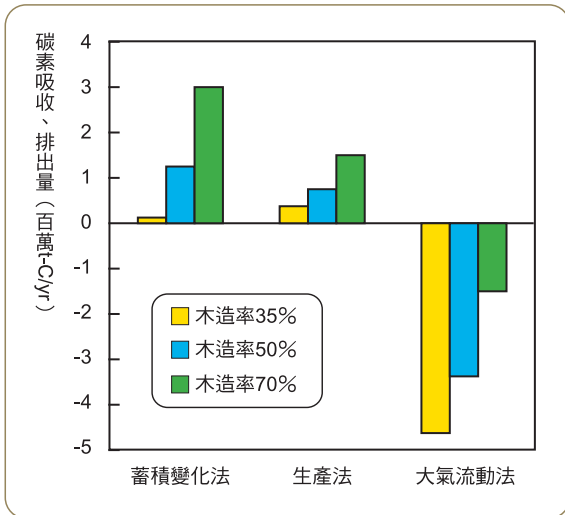


圖6 各種評價方向所得評價值 (文獻5)

c / yr, 170萬公噸c / yr。而在日本被容許由森林所得吸收量之上限為1,300萬公噸-c / yr, 因此使木造率上昇的結果, 木材利用對於碳素吸收量之影響會變大, 可說其對於防止地球溫暖化有很大貢獻。

七、結言

日本新的「森林、林業基本法」為發揮森林所具有多方面機能之目標, 將其區分為「水土保持林」、「森林與人之共生林」、「資源之循環利用林」。日本林野廳為維持該國森

林對CO₂吸收量 (最高限度3.9%) 之必要利用目標, 已將1999年國產材供給量 (即伐採量) 之2,000萬m³ (約佔該國木材消費量之18%) 增加至2010年之2,500萬m³。此國產材之供給量500萬m³之增加目標, 在現階段IPCC之Default法森林伐採會被評價成CO₂之排出, 看起來與確保森林對CO₂之吸收似乎相矛盾。即作為吸收源評價良好之森林是透過疏伐等作業與世代更新加以維持, 而且可期待能生產各種良質木材 (作為吸收源「碳貯藏效果」) 為對象。雖然如此, 除為育林之目的所進行之除伐外, 一般所期待伐採木材之收入。即如不積極的利用, 國產材之伐採, 吸收源3.9%之削減是無法達成。期待作為吸收源之森林是與都市方面各種領域努力的利用國產材相關連。而預定在2010年所增加之500萬m³木材可提供建築部門建造約10萬棟木造住宅 (1棟約40建坪), 每棟住宅約可固定6.8公噸碳素, 全部即可固定68萬公噸碳素, 固定期間可長達40年。即可建造一座都市森林。

依環保署估計我國每減少1公噸CO₂的成本約為400元美金, 而透過造林1公頃可減少37公噸CO₂。因此, 加強森林之撫育經營管理, 增加平地造林面積, 同時有效利用木質材料, 建造木質建築物, 使能成為一座都市森林, 此對於我國因應京都議定書之溫室氣體減量將有積極, 且正面之貢獻。🌱

參考文獻 (請逕洽作者)