

# 大学キャンパスの空調システムを対象としたライフサイクル環境負荷評価

Life cycle environmental load evaluation related to air conditioning systems in the university campus

天野 耕二\* 寺田 幸司\*\*

Koji AMANO\* Koji TERADA\*\*

**ABSTRACT:** In this study, the environmental aspect of the air conditioning system that should take up a large proportion of the entire environmental load of the university campus was investigated. The objective field is the Biwako-Kusatsu Campus (BKC) of Ritsumeikan University. To examine a policy for improvement, we tried a detailed calculation of the energy consumption volume and carbon dioxide emission over the whole life cycle of the air conditioning system on the basis of the ordinary LCI (Life Cycle Inventory) method. It became clear that 99% or more of the life cycle environmental load have been generated on usage stage of the air conditioning system. A comparison of the obtainable air conditioning system and the alternate air conditioning system in the life cycle energy consumption volume and carbon dioxide emission was also attempted. The results showed that conversion to the alternate system could enable the 34.3% reduction of energy consumption volume and the 40.1% reduction of carbon dioxide emission throughout the whole life cycle. However, the alternate system indicated the possibility of larger effect to the global warming when the recovery rate of the refrigerant (chlorofluorocarbons) was below 43.5%.

**KEYWORD:** Air Conditioning System, Life Cycle Inventory, Energy Consumption Volume, Carbon Dioxide Emission

## 1. はじめに

膨大な数の学生や教職員が活動している大学キャンパスでは、自然界から膨大な量の資源・エネルギーが投入される一方で大量の廃棄物などが排出されている。大学の活動にともない排出される環境負荷は自然環境に対して大きな影響を与えていると考えられるが、環境マネジメント手法のグローバルスタンダードとなりつつある ISO14000 シリーズの認証取得を目指す大学も現れてきており、環境負荷低減への取り組みも近年活発化している。本研究では、理工・経営・経済学部の3学部が活動している立命館大学びわこくさつキャンパス（略称はBKC；1994年開校、敷地面積 約 57 万 m<sup>2</sup>、延床面積 約 14 万 m<sup>2</sup>、学生・教職員合計 約 15000 人）において、空調システムの環境側面について詳細に検討する。まず、BKCにおける空調システムについて、システムの製造段階から使用・廃棄段階までのライフサイクル全過程で投入される資源・エネルギー消費量、及び、排出される CO<sub>2</sub> 排出量を算出し、ライフサイクルインベントリ分析（LCI: Life Cycle Inventory）を行う。次に、代替システムや改善施策の検討により、BKCにおける空調システムによる環境負荷量の低減を模索し、それらの比較検討を行うことで有効な改善策を探る。

実際に現場で空調システムを導入する際には、設備費・維持管理費などのコストや設置に必要なスペースなどに重点が置かれており、環境負荷量を考慮に入れるケースは少ない。これには、空調システムが環

---

\* 立命館大学理工学部 Department of Environmental Engineering, Ritsumeikan Univ.

\*\* 立命館大学大学院理工学研究科 Graduate School of Environmental Engineering, Ritsumeikan Univ.

境に及ぼす影響が明確になっていないことも一因として考えられる。今後の環境負荷の少ない持続発展可能な社会を構築していくためには、ライフサイクルアセスメント（LCA：Life Cycle Assessment）などを始めとする環境負荷の定量的評価手法の普及が大きな鍵となっている。本研究では、空調システムの導入や更新時の意思決定に環境負荷という要素を合理的に取り入れる手法を検討するために、大規模キャンパスにおける空調システムの環境側面を評価してみる。

2. 空調機の種類と構造<sup>1), 2), 3)</sup>

一般に、冷房用に用いられている冷凍機には蒸気圧縮式と吸収式がある（図1）。蒸気圧縮式は冷媒を加圧させるのに、主として電動機を動力とした圧縮機を用いる。蒸気圧縮式に用いられる冷媒のほとんどがフッ化ハロゲン化炭化水素系（フロン系）冷媒である。

一方、吸収式は冷媒ガスの圧縮に相当する過程で、圧縮機という機械的エネルギーを使わず、熱エネルギーを用い、科学的プロセスによって冷却作用が行われる。吸収式では冷媒に水（H<sub>2</sub>O）、吸収液に臭化リチウム（LiBr）が用いられている。

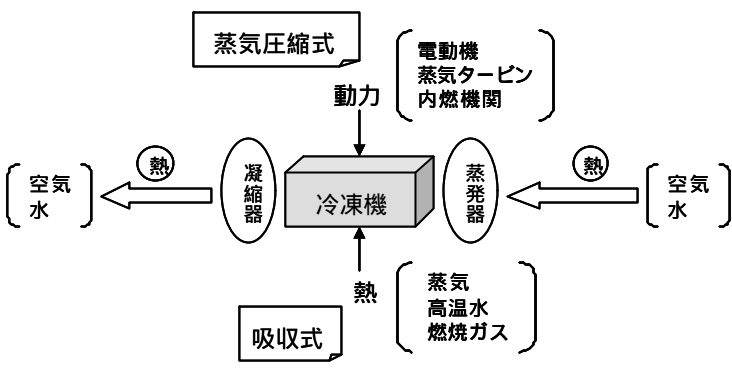


図1 冷凍機の構造と熱の流れ

また、冷凍機の凝縮器からの放熱を暖房に利用したものがヒートポンプである。蒸発器で低温の熱を取り入れ、凝縮器で高温の熱を放出するので、水を高所にくみ上げるポンプとの類似からヒートポンプと呼ばれている。外気、排気、井戸水、河川水、海水、温排水などが採熱源として用いられるが、冬季に冷房負荷と暖房負荷が発生する建物などでは、蒸発器側で冷房を、凝縮器側で暖房を同時に行うこともできる。このように冷凍機は冷房用にも暖房用にも使用できるが、このうち冷暖房兼用と暖房専用のものを空調用ヒートポンプと呼んでいる。（なお、本論文では電動機・エンジンを動力とした蒸気圧縮式空調用ヒートポンプを「ヒートポンプ」と記す。）表1にヒートポンプと吸収式冷温水発生機の成績係数を記した。一般に、ヒートポンプを用いることで入力熱量換算値の数倍の熱が利用できるため、省エネルギー運転が可能となる。また、ヒートポンプは近年の省エネルギー技術開発により成績係数が向上している。

現在、ヒートポンプは家庭用のエアコンに多く使用されているが、業務用ビルの冷房システムについてはガス直焚き吸収式冷温水発生機方式が多くを占めている。近年では、環境保護、省エネルギーの立場から、蓄熱、太陽熱利用、熱回収、コ・ジェネレーション、地域冷暖房などの特殊熱源方式を採用する例があるが、適用事例はまだ少数であり、空調システムの選択は、建設費・設備費・運転費・保守管理費などのコストや、必要スペースが主に考慮され決定されていることが多いのが現状である。

表1 空調機の成績係数（COP）と一次エネルギー基準成績係数

種類	成績係数 COP		一次エネルギー基準成績係数	
	冷房	暖房	冷房	暖房
ヒートポンプエアコン（1984年）	2.5～3.0	3.0～3.5	0.9～1.05	1.05～1.2
（1999年最新省エネモデル）	5.18	5.44	2.04	2.14
（研究対象ヒートポンプエアコン 冷媒 HCFC22）	2.38	2.95	0.94	1.16
吸収式冷温水発生機（単効用式）（1984年）	-	-	0.67	（ボイラ運転）0.8
吸収式冷温水発生機（二重効用式）（1984年）	-	-	0.85～0.9	（ボイラ運転）0.8
（BKC設置吸収式冷温水発生機）	-	-	1.01	（ボイラ運転）0.84

ただし、冷温水発生機については稼働時の消費電力を含んでいない。 発電効率 = 39.4%

### 3. 対象範囲と評価手法<sup>4), 5), 6)</sup>

部品・製品輸送、販売・購入、空調設備施工、修理補修・維持管理、解体の各段階については研究対象外とする。空調システムを設置するための施設、建物、及び、配管、制御装置などから発生する環境負荷については含めないこととした。

使用段階については、法定耐用年数である減価償却期間を用い、15年間稼動するものとして分析を行う。また、1998年度使用量データを用い、15年間は電気およびガス使用量の年変動がないものと仮定した。廃棄・リサイクル段階において、鉄・銅・アルミニウムは100%リサイクルされるものとし、リサイクルの効果をすべて算入することにした。しかし、その他の資材については、解体・処理段階で発生する環境負荷を算入しない。評価の手法としては、対象製品のライフサイクルのフローを作成し、プロセスごとの各環境負荷項目を調査、負荷量を算出し、集計することにより環境負荷を求める積み上げ法を用いる。また、対象環境負荷項目として、エネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量を取り上げ、一般的なLCI分析を行った。

### 4. BKC 現行の空調システムのライフサイクル評価

キャンパス内の空調システムとしては、基本的には、ガス直焚き吸収式冷凍機を搭載した冷温水発生機 12 台で都市ガスを使用して冷温水を作り、3145 台のファンコイルユニット（FCU）と 33 台のエアハンドリングユニット（AHU）に送り、室内の空気を通すことで空調を行っている（図2）。

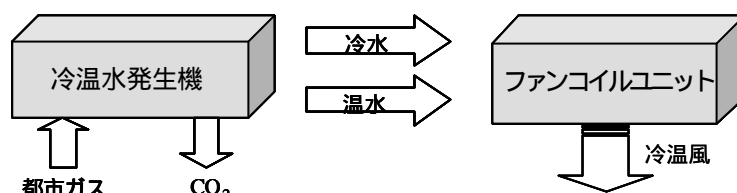


図2 BKCの現行の空調システム

BKCの現行空調システムの環境負荷量は使用段階が圧倒的に割合が大きく、エネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量のどちらも、ライフサイクル全体の99%以上を占めることがわかった（表2）。

表2 各ライフサイクルステージにおけるエネルギー消費量、CO<sub>2</sub>排出量

ライフサイクルステージ	エネルギー消費量		CO <sub>2</sub> 排出量	
	kcal/システム	%	kgCO <sub>2</sub> /システム	%
素材製造段階	$1.61 \times 10^9$	0.54	$6.56 \times 10^5$	1.13
部品・製品組立段階	$1.03 \times 10^9$	0.35	$2.18 \times 10^5$	0.37
使用段階 (15年)	$2.95 \times 10^{11}$	99.46	$5.78 \times 10^7$	99.37
廃棄・リサイクル段階	$1.04 \times 10^9$	-0.35	$5.08 \times 10^5$	-0.87
ライフサイクルトータル	$2.97 \times 10^{11}$	100.00	$5.82 \times 10^7$	100.00

また、BKCのライフサイクル全体における年間延床面積あたりのCO<sub>2</sub>排出量<sup>7)</sup>との比較も試みた。その結果、BKCのライフサイクル全体から排出されるCO<sub>2</sub>の量の23.0～25.2%（BKCの運用期間によって変動）を現行の空調システムが排出していることがわかった。大学施設全体のCO<sub>2</sub>排出量の約1/4と大きなウェイトを占めていることから、空調システムの環境負荷量の削減を図ることが、BKC全体のCO<sub>2</sub>排出量の削減に大きく寄与することが明らかである（図3）。

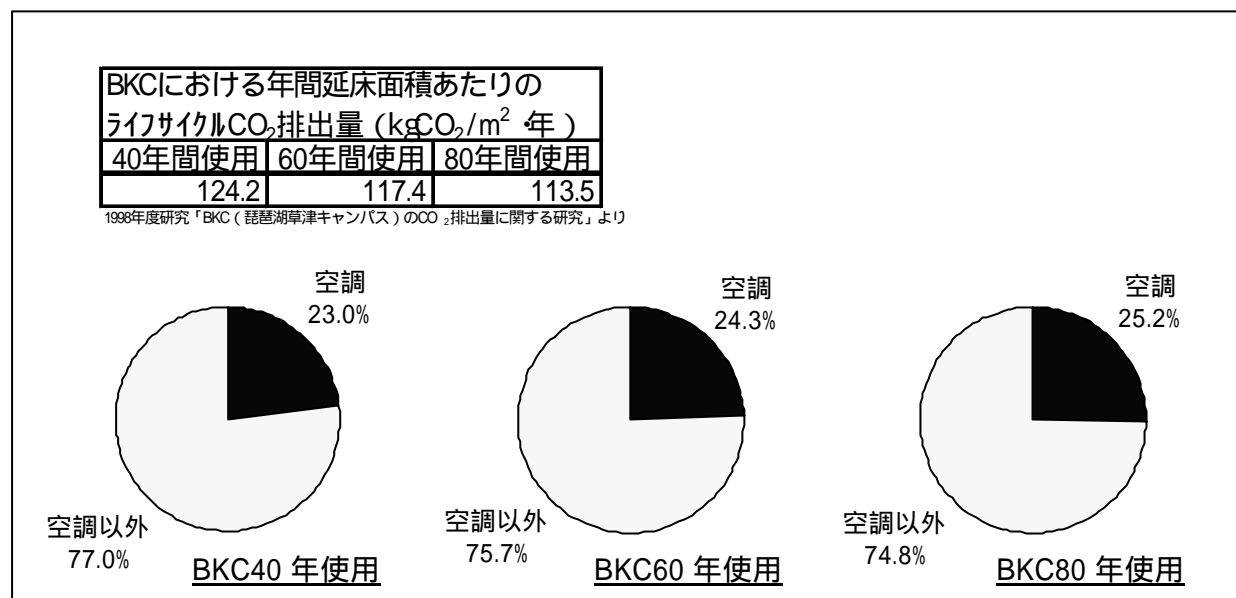


図3 BKC全体におけるCO<sub>2</sub>排出量原単位 (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>・年) と、空調システムの占める割合

## 5. 代替システムの評価

空気熱源ヒートポンプエアコン（動力は電気）を代替システムとして、現行の空調システムに対して環境負荷量での比較検討を行う。比較の前提として、機能単位の統一をする必要がある。そこで、冷凍能力の単位である USRT（米国冷却トン）を機能単位とし同じ冷凍能力になるように仮定し比較を行った。

### 5.1 代替システムとの環境負荷量の比較

現在、BKC に設置されている冷温水発生機による空調システムの総冷凍能力は3835USRT であり、これと同能力の 6.4USRT ヒートポンプ型エアコン 600台を代替システムとしてエネルギー消費量、CO<sub>2</sub> 排出量をライフサイクル全体で比較を行った。ライフサイクルの段階ごとのエネルギー消費量と CO<sub>2</sub> 排出量を表3にまとめた。その結果、現行システムからヒートポンプ型空調システムへの転換によって、ライフサイクルトータルで、エネルギー消費量が 34.3%、CO<sub>2</sub> 排出量が 40.1%削減できることがわかった（図4）。

表3 ライフサイクル各段階におけるエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量

ライフサイクルステージ	エネルギー消費量 kcal/システム				CO <sub>2</sub> 排出量 kgCO <sub>2</sub> /システム			
	ヒートポンプ	%	現行システム	%	ヒートポンプ	%	現行システム	%
素材製造段階	1.10 × 10 <sup>9</sup>	0.6	1.43 × 10 <sup>9</sup>	0.5	4.57 × 10 <sup>5</sup>	1.6	5.83 × 10 <sup>5</sup>	1.2
部品・製品組立段階	5.84 × 10 <sup>8</sup>	0.4	9.41 × 10 <sup>8</sup>	0.4	1.25 × 10 <sup>5</sup>	0.4	1.98 × 10 <sup>5</sup>	0.4
使用段階 (15年)	1.73 × 10 <sup>11</sup>	99.4	2.63 × 10 <sup>11</sup>	99.5	2.91 × 10 <sup>7</sup>	99.2	4.87 × 10 <sup>7</sup>	99.3
廃棄・リサイクル段階	6.41 × 10 <sup>8</sup>	-0.4	9.42 × 10 <sup>8</sup>	-0.4	3.54 × 10 <sup>5</sup>	-1.2	4.51 × 10 <sup>5</sup>	-0.9
ライフサイクルトータル	1.74 × 10 <sup>11</sup>	100.0	2.64 × 10 <sup>11</sup>	100.0	2.93 × 10 <sup>7</sup>	100.0	4.90 × 10 <sup>7</sup>	100.0

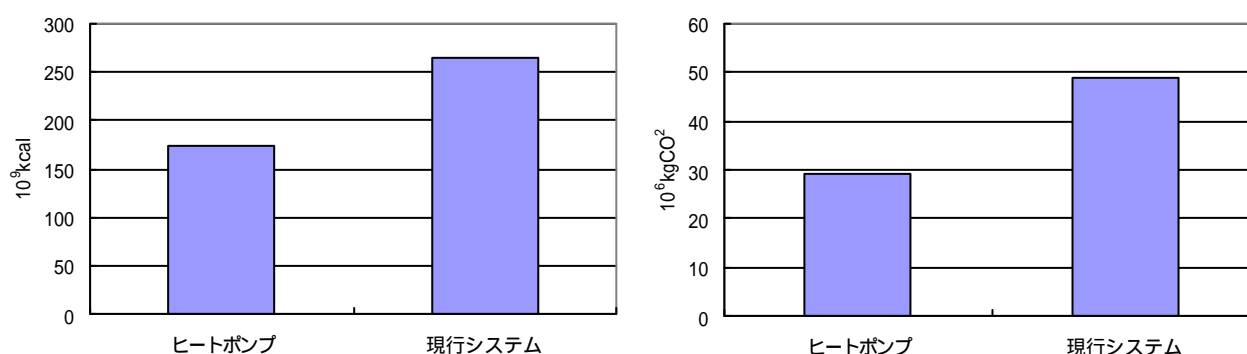


図4 ライフサイクル全体のエネルギー消費量とCO<sub>2</sub>排出量の比較

よって、空気熱源ヒートポンプエアコンへの転換が、BKCにおける空調システムから発生する環境負荷量の削減へのひとつの有効な手段であることが考えられる。また、空調システムの小型分散化によってきめこまやかな調整が可能になり、快適性ならびに運転効率も向上するであろう。このように、ライフサイクルで見ると、ヒートポンプ型空調システムへの転換が環境負荷量においては有効であるが、実際の設置に際しては、コスト、必要スペース、維持管理の容易さ、安全性、そして、騒音・振動などの要素と共に考慮する必要がある。

## 5.2 フロン系冷媒の考慮

冷温水発生機に使用されている冷媒は水であるが、ヒートポンプ型空調システムには冷媒としてフロン系冷媒（対象製品ではHCFC-22）が使われているため、廃棄段階においてそれらが大気中に放出される時の環境負荷量も考えなくてはならない。代替システムの空気熱源ヒートポンプエアコン 600 台あたりには、冷媒として8100kgのHCFC-22が充填されている。HCFC-22の地球温暖化ポテンシャル（GWP: Global Warming Potential）の20年値は4300であるため、充填された冷媒が100%大気中に放出されるのであれば $3.48 \times 10^7$  kgのCO<sub>2</sub>排出量と同じ負荷となる（表4）。これは代替システムのライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub>排出量（ $2.93 \times 10^7$  kg）をも超える値となり、CO<sub>2</sub>排出とHCFC-22排出による地球温暖化負荷量をトータルすると、現行のシステムが及ぼす地球温暖化負荷量より大きな負荷になり得る。本研究では、廃棄時のHCFC-22回収率が43.5%以下の場合において、ヒートポンプ型空調システムの地球温暖化負荷量が上回ることが明らかになった（図5）。また、HCFC系の代替フロンはオゾン層破壊能力も有しており、その環境負荷も考慮する必要がある。よって、ヒートポンプ型空調システムに転換するのであれば、オゾン層破壊ポテンシャル（ODP: Ozone Depleting Potential）がほとんどないHFC系の代替フロンの使用、そして、廃棄時におけるフロン系冷媒の回収の徹底を図る必要があると言える。

表4 代替フロンのGWPとODP<sup>8</sup>

代替フロン	平均寿命 (年)	GWP (CO <sub>2</sub> を1)			ODP (CFC11を1)
		20年値	100年値	500年値	
HCFC-22	13.3	4300	1700	520	0.05
HFC-134 a	14.6	3400	1300	420	0

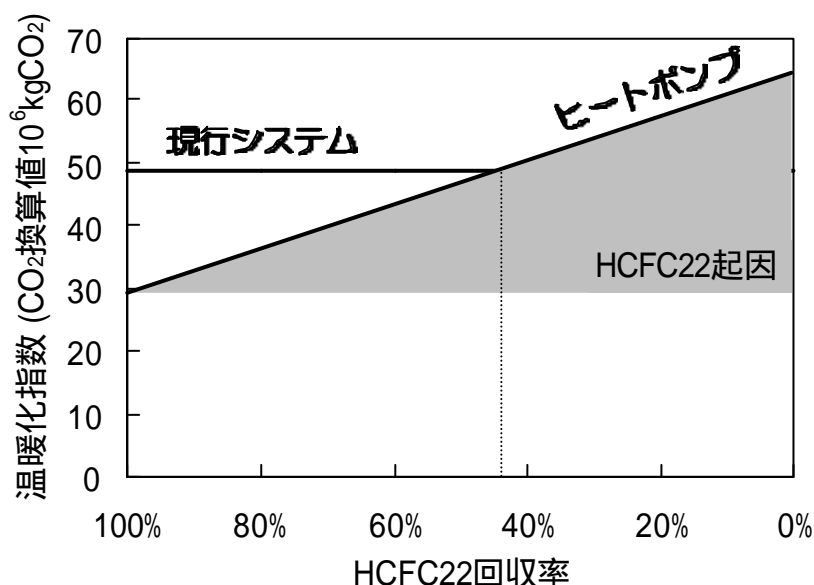


図5 HCFC22回収率による地球温暖化負荷量の変化（GWP20年値を使用）

## 6. まとめ

- ・ BKC（立命館大学びわこくさつキャンパス）における現行空調システムが起因の CO<sub>2</sub> 排出量は 28.6kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>・年、287kgCO<sub>2</sub>/人・年であり、BKC 施設全体のライフサイクルから排出される CO<sub>2</sub> 排出量の 23.0～25.2%を占めており、空調システムの新規導入や更新時の意思決定に環境負荷という要素を取り入れる必要がある。
- ・ BKC における現行空調システム（ガス直焚き吸収式冷温水発生機方式）を空気熱源ヒートポンプ型空調システムに転換すると、ライフサイクル全体でエネルギー消費量の 34.3%、CO<sub>2</sub> 排出量の 40.1%が削減でき、環境負荷低減が期待できる。しかし、廃棄時におけるフロン系冷媒（HCFC-22）の回収率が 43.5%以下の場合においては、ヒートポンプ型空調システムの地球温暖化負荷量の方が大きくなる。
- ・ 大規模キャンパスにおける空調システムの環境側面を正確に評価するためには、考慮する環境負荷項目を増やし、修繕管理や大型更新などを含めて評価対象範囲を拡大していかなばならない。さらには、影響評価（Impact Assessment）を加えて厳密な意味での LCA によって評価することも必要である。また、コストなど他の要素との評価を含めることも事業実施段階では求められる。
- ・ BKC における現行空調システムのライフサイクル全体でのエネルギー消費量、CO<sub>2</sub> 排出量のうち 99%以上の非常に大きなウェイトを占めている使用段階について、時間変動や、設定温度、建物構造などを考慮することが、環境負荷量の低減への施策の提案につながると考えられる。また、自家発電の排熱を有効に利用できるコ・ジェネレーションシステムも、実際にいくつかの大学施設でも採用されてきており、燃料電池なども含め、これらの新しい代替技術に関しても検討範囲に入れることが、有効な環境負荷量削減施策を立案するためには必要である。

## < 参考文献 >

- 1) (社)空気調和・衛生工学会 編；空気調和設備の実務の知識，157-167，(株)オーム社，1986
- 2) (社)空気調和・衛生工学会 編；空気調和・衛生設備の知識，58-61，(株)オーム社，1991
- 3) 小笠原 祥五，清水 邦雄，電力空調研究科会 編；ヒートポンプ空調システム，15-25，(株)オーム社，1992
- 4) 製品等による環境負荷評価手法等検討調査報告書（平成 9 年度環境庁調査業務結果報告書）；第 1 章，第 2 章，第 4 章，(社)環境情報科学センター，1998
- 5) 基礎素材のエネルギー解析調査報告書，(社)化学経済研究所，1993
- 6) 二酸化炭素排出量調査報告書，環境庁，1992
- 7) BKC（立命館大学びわこくさつキャンパス）の CO<sub>2</sub> 排出量に関する研究，1998 年度立命館大学理工学部卒業研究，1999
- 8) IPCC-WG1（Intergovernmental Panel on Climate Change-Working Group1）Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press，1995