

はじめに

先の菅内閣は 2020 年 10 月末に、日本政府としては初めて「2050 年までに二酸化炭素のネット（正味）排出量をゼロにする（カーボンニュートラル）」との政策目標を表明しました。現在の岸田内閣でもこれは踏襲され、さまざまな脱炭素政策が進められています。国際的にも、IPCC（気候変動に関する政府間パネル）の第 6 次評価報告書や COP（国連気候変動枠組条約締約国会議）で、脱炭素の流れが加速化されてきています。

カーボンニュートラル（炭素中立）はゼロカーボン、カーボンフリー、脱炭素などと言われてきましたが、実際にカーボン（炭素）をゼロにするのではなく、二酸化炭素を主とする温室効果ガスの大気中の増加分を正味ゼロ（ネットゼロ）にする意味です。

カーบอนは私たちの体の基本となっていて、人類は炭素型生物と称されます。炭素は、科学技術で原子量の質量単位は炭素 12 を基準にしているほど重要な物質です。「カーボンニュートラル」とは、「カーボンフリー社会」や「脱炭素社会」を目指すキャッチフレーズなのです。

本書では、カーボンニュートラルの技術や課題について、幅広く、かつ、やさしく解説します。全体構成は、以下のとおりです。

基礎編：概要（第 1 章）と環境問題（第 2 章）

技術編：技術概要（第 3 章）、ハード技術（第 4～6 章）とソフト技術（第 7 章）

政策編：国内政策（第 8 章）と国際政策（第 9 章）

未来編：展望（第 10 章）

基礎編としての第 1 章では、カーボンニュートラルとは何か、そして、それを実現するための国内および国外の政策を概観し、カーボンニュートラルの全貌をまとめます。第 2 章では、エネルギー消費による二酸化炭素排出と環境問題との関連、とりわけ、地球温暖化問題に言及し、対策としての緩和策・適応策についてまとめます。

技術編では、第 3 章でカーボンニュートラルのための技術の概要をまとめます。ハード技術の具体的説明として、第 4 章で化石・自然・核エネルギーのさまざまな創エネ技術、第 5 章で電動自動車を含めた省エネ技術、第 6 章で炭素資源のリサイクル技術を説明します。第 7 章ではソフト技術として炭素排出量算定方法を説明します。

政策編では、第 8 章でグリーン成長戦略などの国内政策や、第 9 章でパリ協定などの脱炭素国際協調についてまとめます。

未来編として、第 10 章で核融合や宇宙太陽光発電の未来のエネルギーと、宇宙環境を含めた未来の環境についての展望を述べます。

全世界で貧困社会をなくするためには、現状では最低限のエネルギーの消費の増加は避けられません。新しいエネルギー源の開発も必須ですが、質の良いエネルギー源でなければ、それによって環境が汚染される可能性があります。

今後のエネルギーをどのように確保・推進していくかは極めて重要な課題です。化石・自然・核エネルギーに加えて、省エネルギーと未来エネルギーを育てる必要があります。そのための 5 つの挑戦

- 化石エネルギーの環境性への挑戦、
- 自然エネルギーの実用性への挑戦、
- 核エネルギーの安全性への挑戦、
- 省エネルギーの効率性への挑戦、
- 未来エネルギーの可能性への挑戦、

が必要となっています。

持続可能な輝かしい未来を展望しようとする場合には、

- 技術楽観主義
- 開発調和主義
- 自然回帰主義

のどこに軸足を置いて考えるかで、推進方針が異なってきます。これまでは、産業革命以来の旧来の技術楽観主義から開発調和主義へとシフトしていると考えられます。さらに、地球環境を大切にするためには、自然回帰主義的発想が必要になってきますし、逆に、未来の宇宙文明を夢見る場合には、さらなる技術開発が必要になると考えられます。

自然と開発との調和を求めている考えが、そして、世界のすべての人々が享受できる持続可能な開発目標が、国際連合の現在の SDGs（持続可能な開発目標）として設定されています。そのような SDGs 時代の脱炭素化をめざしてのカーボンニュートラルのためのさまざまな技術開発や環境・産業政策が、現在試みられています。本書が、これらの現在の課題を幅広く考え未来の展望を切り拓く契機となればと、願っています。

2022 年 7 月吉日

山崎耕造

目 次

第 1 章	カーボンニュートラルのあらまし(全体概要)	1
第①話	カーボンニュートラルとは？	2
第②話	カーบอนは元素の王様？	4
第③話	地球のカーボンサイクルは？	6
第④話	二酸化炭素排出量は？	8
第⑤話	なぜニュートラルが必要か？	10
第⑥話	カーボンバジェットで考える？	12
第⑦話	日本で可能なのか？	14
第⑧話	国際的な協定は？	16
	コラム 1 サステナブルとは？ (エネルギー保存とエントロピー増大)	18
第 2 章	カーボンニュートラルのエネルギーと環境(地球温暖化問題)	19
第⑨話	エネルギー・環境問題とSDGsとは？	20
第⑩話	地球温暖化とノーベル賞は？	22
第⑪話	地球の温度の長期的変動は？	24
第⑫話	地球の温度の短期的変動は？	26
第⑬話	地球温暖化の証拠は明確か？	28
第⑭話	地球温暖化の原因は？	30
第⑮話	地球温暖化の予測は？	32
第⑯話	地球温暖化の緩和・適応策は？	34
	コラム 2 地球は寒冷化する？ (地球温暖化と熱塩循環)	36
第 3 章	カーボンニュートラルの技術のあらまし(脱炭素技術概要)	37
第⑰話	緩和の技術策は？	38
第⑱話	適応の技術策は？	40
第⑲話	創エネによるカーボンニュートラルは？	42
第⑳話	電化によるカーボンニュートラルは？	44
第㉑話	省エネによるカーボンニュートラルは？	46

第22話	蓄エネによるカーボンニュートラルは？	48
第23話	カーボンリサイクルとは？	50
第24話	カーボンプライシングとは？	52
第25話	金融のグリーン化とは？	54
第26話	カーボンオフセットとJ-クレジットとは？	56
	コラム3 海面上昇はいつまで続く？ (熱膨張と氷床不安定性)	58

第4章 カーボンニュートラルの創エネ技術(脱炭素電源開発) ——59

第27話	一次と二次エネルギーとは？	60
第28話	石炭火力の利用は？	62
第29話	石炭火力の低炭素化は？	64
第30話	石油火力での低炭素化は？	66
第31話	天然ガス火力は二酸化炭素排出が少ない？	68
第32話	太陽熱発電と太陽光発電の違いは？	70
第33話	太陽光発電は主電源となりえるのか？	72
第34話	風力発電の効率化は？	74
第35話	風力発電は陸上から洋上へ？	76
第36話	小水力の利用は？	78
第37話	海洋エネルギーの利用は？	80
第38話	地熱発電の可能性は？	82
第39話	バイオ発電は？	84
第40話	在来原子炉の構成は？	86
第41話	在来原子炉の改良はどうする？	88
第42話	高温ガス炉は安全か？	90
第43話	小型モジュール炉とは？	92
第44話	核燃料サイクルはどうする？	94
第45話	未利用エネルギーの環境発電は？	96
	コラム4 自然災害のエネルギー利用とは？ (台風発電と雷発電)	98

第5章 カーボンニュートラルの省エネ技術(脱炭素製品開発) ——99

第46話	エネルギーの供給と消費は？	100
第47話	製鉄の水素還元化とは？	102

第⑩話	セメント製造の脱炭素化は？	104
第⑪話	自動車の電化は？	106
第⑫話	飛行機も電動化できる？	108
第⑬話	家庭での電化と脱炭素化は？	110
第⑭話	家の省エネは？	112
第⑮話	情報システムの省エネ、超伝導化は？	114
	コラム 5 LED 照明は省エネで割安か？ (白熱電球、蛍光灯、LED)	116

第 6 章 カーボンニュートラルのリサイクル技術(炭素資源再利用) —— 117

第⑯話	炭素のリサイクルの方法は？	118
第⑰話	空気中の二酸化炭素回収は？	120
第⑱話	二酸化炭素の地中貯蔵は？	122
第⑲話	ネガティブエミッション技術は？	124
第㉑話	二酸化炭素の固体化は？	126
第㉒話	二酸化炭素の燃料化は？	128
第㉓話	水素エネルギーサイクルの利用は？	130
第㉔話	窒素サイクル利用は？	132
	コラム 6 水素の色はとりどり？ (グリーン、ブルー、グレー、ブラウン)	134

第 7 章 カーボンニュートラルのアセスメント技術(炭素排出量算定) — 135

第㉕話	サプライチェーン排出量とは？	136
第㉖話	排出原単位のデータベースは？	138
第㉗話	ライフサイクルアセスメントとは？	140
第㉘話	排出量の算定例は？	142
第㉙話	電源の比較検討は？	144
第㉚話	カーボンフットプリントとエコリーフとは？	146
	コラム 7 プラント肉はエコか？ (牛のゲップと人間の呼吸)	148

第 8 章 カーボンニュートラルの日本の取組み(脱炭素国内政策) —— 149

第㉛話	2050 年に達成？	150
第㉜話	日本の現状は？	152

第70話	FIT から FIP へ？	154
第71話	ウィズコロナ・ポストコロナの社会は？	156
第72話	産業政策「グリーン成長戦略」とは？	158
第73話	カーボン規制策は？	160
第74話	ゼロカーボンシティ宣言とは？	162
第75話	多くの企業が取り組んでいる？	164
第76話	個人でなにができるの？	166
コラム 8 世界のエネルギー転換指数とは？ (エネルギートライアングル)		168

第 9 章 カーボンニュートラルの世界の取組み(脱炭素国際協調) —— 169

第77話	歴史的経緯は？	170
第78話	IPCC、COP とは？	172
第79話	京都議定書とその後は？	174
第80話	パリ協定とは？	176
第81話	なぜ 2℃よりも 1.5℃なのか？	178
第82話	MDGs から SDGs へ？	180
第83話	2050 年へのロードマップは？	182
コラム 9 世界終末時計は 0 時何分前？ (ロシア・ウクライナ危機)		184

第 10 章 カーボンニュートラルの未来(未来エネルギー展望) —— 185

第84話	未来のエネルギー開発の展望は？	186
第85話	未来の核融合発電は？	188
第86話	未来の宇宙太陽光発電は？	190
第87話	未来の地球環境保全の展望は？	192
第88話	地球から宇宙への飛躍は？	194
コラム 10 宇宙環境での革新技术は？ (ワームホールとテレポーテーション)		196

参考図書・参考ウェブサイト	197
索引	198

第 1 章

カーボンニュートラルの あらまし (全体概要)

カーボンニュートラル（炭素中立）とは何か、なぜ必要か、を説明し、カーボン（炭素）元素の重要性やカーボンサイクルについて述べます。二酸化炭素（カーボンダイオキサイド）の大気中への排出について考え、日本でのカーボンニュートラルの政策や国際協力についても概観します。

カーボンニュートラルとは？

脱炭素化としてのカーボンニュートラル宣言がなされ、そのためのさまざまな政策が推進されてきています。そもそも、カーボンニュートラル（炭素中立）とは何でしょうか？

■総理大臣によるカーボンニュートラル宣言

菅（前）内閣総理大臣は 2020 年秋の臨時国会での所信表明演説で、「2050 年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち 2050 年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指す」ことを宣言しました。続く岸田内閣総理大臣も、2021 年 11 月の COP26 世界リーダーズ・サミットで 2050 年カーボンニュートラル、特に自動車のカーボンニュートラルの実現に向けての開発を展開すると表明しています（上図）。

これまで、2015 年のパリ協定採択時において、政府（当時の安倍内閣）の公式目標は 2013 年度比で 2030 年には総量の 26% 減、そして、非公式目標でしたが 2050 年には 80% 減が掲げられていました。これを 2030 年には 46% 減、2050 年には実質的に 100% 減としたこととなります。国内では、今回の 2050 年のカーボンニュートラルに向けてのさまざまな取組みが試みられています。

■カーボンニュートラルのしくみ

温室効果ガスとして最も重要なガスは二酸化炭素ですが、カーボンニュートラル（炭素中立）とは温室効果ガス（GHG、グリーンハウスガス）の排出の全体量を実質的にゼロにすることです。実際に排出量をゼロにするのではなくて、温室効果ガスの排出量から、森林などによる二酸化炭素ガスの吸収量を差し引いて、大気中への増加分を正味ゼロ（ネットゼロ）にすることを意味しています（下図）。

温室効果ガスの典型としての二酸化炭素（カーボンダイオキサイド）の意味でカーボン（炭素）と略して、カーボンニュートラル（炭素中立）、あるいは、ゼロカーボン（零炭素）、ゼロエミッション（零排出）、カーボンフリー（炭素なし）、などと呼ばれており、デカーボニゼーション（脱炭素化）とも言われます。カーボンニュートラルは、脱炭素社会の構築のためのキーワードとなっています。

二酸化炭素ではなくて、文字どおりカーボンそのものも問題とされてきています。地上近くの大気中のスス（ブラックカーボン）が雪面上に降り積もり、太陽の熱を吸収して温暖化の原因ともなっています。

2050年カーボンニュートラルの宣言

2020年10月26日

第203回臨時国会での菅(前)内閣総理大臣の所信表明演説

我が国は、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体としてゼロにする、すなわち2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを、ここに宣言いたします(拍手)。



菅 義偉

2021年11月2日 英国、グラスゴー

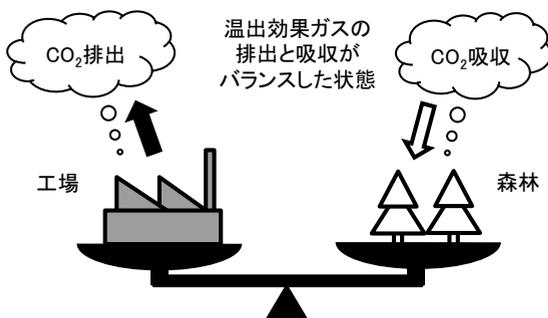
COP26世界リーダーズ・サミットでの岸田内閣総理大臣のスピーチ

『2050年カーボンニュートラル』。日本は、これを、新たに策定した長期戦略の下、実現してまいります。



岸田文雄

カーボンニュートラル(炭素中立)のイメージ



技術改革などにより工場からの排出を削減し、植林などにより吸収を増大させる必要があります。

要点

カーボンニュートラル(炭素中立)とは、二酸化炭素をはじめとする温室効果ガスの排出量から、森林などによる温室効果ガスの吸収量を差し引いて、大気中への増加分を正味ゼロ(ネットゼロ)にすることです。

カーボンは元素の王様？

カーボンは有機物を特徴づける元素であり、ダイヤモンドを形づくる元素でもあります。原子の質量単位は炭素で定義されており、まさに、炭素は元素の王様なのです。

■有機物と無機物の違い

有機物と無機物とを区別するのはカーボン（炭素）です。有機物は炭素を含み、炭素が6個結合している「亀の甲」と呼ばれるベンゼン環（炭素と水素で作られる六角形）が有名です。ただし、単純な二酸化炭素、一酸化炭素、炭素は無機物です。有機物は燃やすことで無機物としての二酸化炭素が発生します（上図）。カーボンは私たちの体の基本となっていて、人類は炭素型生物と称されますが、カーボンはその有機物の根幹なのです。

■ダイヤモンドとグラファイトの違い（同素体）

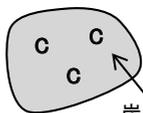
すべての物質は、その性質を示す最小の成分としての元素から成り立っています。同じ元素からつくられる単体でも、性質や構造の異なる物質が2種類以上存在する場合があります。これは「同素体」と呼ばれます。典型例として、炭素元素や酸素元素（酸素、オゾンなど）、鉄元素（フェライト、オーステナイトなど）があります。

特に、カーボンには多様な型式の同素体が存在します。中図に示した分子構造のように、ダイヤモンド、グラファイトのほかに、グラフェン、ナノチューブやフラレンがあります。炭素原子には隣の原子と結合する手（共有結合）が4本あります。ダイヤモンドでは1つだけ2本の手を使って、炭素が3次元的に結合された強固な構造がつけられています。グラファイト（黒鉛、石墨）の場合は、炭素の平面的な六角構造が乱雑に重なり合った緩い分子構造です。

■炭素 12 は原子質量の基準（同位体）

炭素元素の原子核に含まれる陽子は6個であり、通常の炭素原子（99%ほど）では、内部の中性子数は6個で質量数は12です。これは炭素 12 と呼ばれます。中性子数が異なる炭素 13、炭素 14 もあり、これらは「同位体」と呼ばれます（下図）。元素の質量の基準としての原子質量単位（AMU）は、炭素 12 の質量の12分の1として定義されています。大気中の二酸化炭素は、ほとんどが安定な炭素 12 でつくられていますが、微量ですがほかの炭素同位体でもつくられた二酸化炭素も混じっています。

炭素は有機物の根幹



炭素を含む

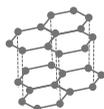


燃えると
二酸化炭素が出る

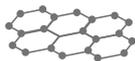
さまざまな炭素元素の構成 (同素体)



ダイヤモンド



グラファイト



グラフェン
(平面構造)



ナノチューブ
(円筒構造)



フラーレン
(5角形と6角形での球面構造)

質量数の異なる炭素原子 (同位体)

炭素12の原子核
(Carbon-12 ^{12}C)



● 陽子 6個

○ 中性子 6個

炭素の原子番号
(=陽子数)は6です。

炭素12の質量数
(=陽子数と中性子数の和)
は12です。

同位体	天然存在比	中性子個数	特徴
炭素-12 ^{12}C	98.9 %	6個	安定
炭素-13 ^{13}C	1.1 %	7個	安定
炭素-14 ^{14}C	1×10^{-8} %	8個	ベータ崩壊

原子の質量は、炭素12を基準として定義されています。

要点

有機物の特徴は、炭素を含んでおり、燃焼すると二酸化炭素が放出されることです。同素体とは、元素の単体で、原子の配列や結合が異なり、性質も異なる物質であり、同位体とは、原子番号が同じで、質量数 (陽子数と中性子数の合計) が異なる原子です。

【著者略歴】

山崎 耕造 (やまざき こうぞう)

1949年富山県生まれ。1972年東京大学工学部卒業。1977年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了・工学博士。名古屋大学プラズマ研究所助手・助教授、核融合科学研究所助教授・教授を経て、2005年4月より名古屋大学大学院工学研究科エネルギー理工学専攻教授。その間、1797年より約2年間、米国プリンストン大学プラズマ物理研究所客員研究員、1992年より3年間、(旧)文部省国際学術局学術調査官。2013年3月名古屋大学定年退職。現在、名古屋大学名誉教授、自然科学研究機構核融合科学研究所名誉教授、総合研究大学院大学名誉教授

主な著書に『トコトンやさしい環境発電の本』『トコトンやさしい量子コンピュータの本』『トコトンやさしい相対性理論の本』『トコトンやさしいエネルギーの本(第2版)』(以上、日刊工業新聞社)、『楽しみながら学ぶ物理入門』『エネルギーと環境の科学』(以上、共立出版)など

カーボンニュートラル

図で考える SDGs 時代の脱炭素化

定価はカバーに表示してあります。

2022年7月25日 1版1刷 発行

ISBN978-4-7655-3480-2 C3030

著 者 山 崎 耕 造

発 行 者 長 滋 彦

発 行 所 技 報 堂 出 版 株 式 有 限 公 司

〒101-0051 東京都千代田区神田神保町1-2-5

電 話 営 業 (03)(5217)0885

編 集 (03)(5217)0881

F A X (03)(5217)0886

振替口座 00140-4-10

<http://gihodobooks.jp/>

日本書籍出版協会会員

自然科学書協会会員

土木・建築書協会会員

Printed in Japan

© YAMAZAKI Kozo, 2022

装幀 ジンキッズ 印刷・製本 三美印刷

落丁・乱丁はお取り替えいたします。

JCOPY 〈出版者著作権管理機構 委託出版物〉

本書の無断複写は著作権法上での例外を除き禁じられています。複写される場合は、そのつど事前に、出版者著作権管理機構（電話：03-3513-6969、FAX：03-3513-6979、e-mail: info@jcopy.or.jp）の許諾を得てください。