2.A.1 セメント製造（Cement Production）（CO_2）

1．排出・吸収源の概要

1.1 排出・吸収源の対象及び温室効果ガス排出メカニズム

セメントは、石灰石、粘土、けい石等をキルン等で焼成・急冷して得られるクリンカと呼ばれる焼塊を粉砕したものに、石膏、混合材等を添加して製造される。工程中、炭酸カルシウム（$CaCO_3$）を主成分とする石灰石が焼成され、酸化カルシウム（CaO）を主成分とするクリンカになる際に CO_2 が排出される。また、石灰石には $CaCO_3$ のほかに微量ながらも炭酸マグネシウム（$MgCO_3$）が含まれており、$MgCO_3$ の焼成によっても CO_2 が排出される（下式参照）。

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$
$$MgCO_3 \rightarrow MgO + CO_2$$

1.2 排出・吸収トレンド及びその要因

我が国のセメント産業はかつて公共事業の拡大とともに先進国でも有数の規模を誇っていたが、1996 年度をピークに公共事業の縮小と景気悪化の影響が強まるとセメント需要も減少傾向となり、セメント製造からの CO_2 排出量も減少傾向となった。2011 年の震災直後は復興需要などによりセメント需要が伸び、排出量も増加傾向となったが、2014 年度以降は横ばい傾向が続き、近年は減少傾向にある。

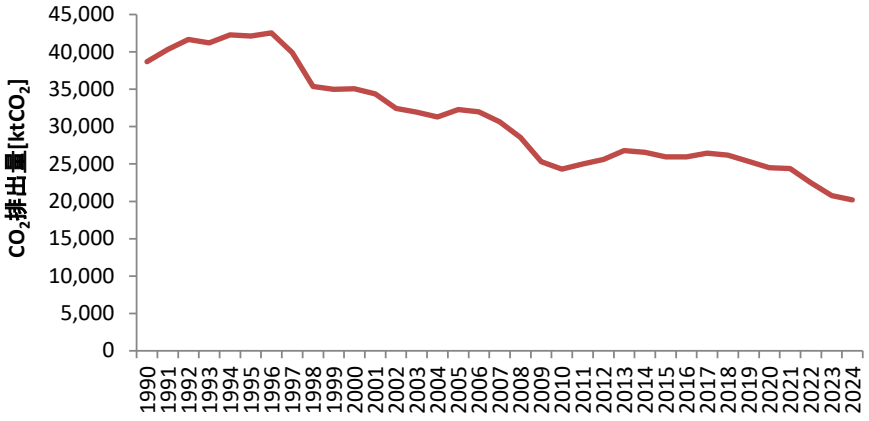


図 1　セメント製造からの CO_2 排出量の推移

2．排出・吸収量算定方法

2.1 排出・吸収量算定式

セメントの中間生産物であるクリンカの生産量に、我が国独自のクリンカ生産量当たりの排出係数を乗じ、更にセメントキルンダスト（CKD）補正係数を乗じて CO_2 排出量を算定している。なお、CKD とは石灰石の焼成が行われるキルン（窯）内から排出されるダストのことで、一部脱炭酸されており CO_2 の発生を伴うものの、活動量であるクリンカ生産量には含まれない。そのため、クリンカ生産量を活動量として排出量を算定する際には CKD 補正係数により算定結果の補正

を行う必要がある。我が国の場合、CKD は製造工程において通常ほぼ全量回収・リサイクルされていることがセメント協会により確認されていることから、CKD 補正係数については 1.00 を使用している。

$$E = AD * EF * CKD$$

E ：セメント製造に伴う CO_2 排出量［t-CO_2］
AD ：クリンカ生産量［t-clinker］
EF ：クリンカ生産量当たりの排出係数［t-CO_2/t-clinker］
CKD ：CKD 補正係数［-］

2.2 排出係数

クリンカ中の CaO 含有率に CaO と CO_2 の分子量比（0.785）を乗じて $CaCO_3$ 由来の CO_2 排出係数を求め、また、同様にクリンカ中の酸化マグネシウム（MgO）含有率に MgO と CO_2 の分子量比（1.092）を乗じて $MgCO_3$ 由来 CO_2 排出係数を求め、両者の合計値をセメント製造における CO_2 排出係数として設定する。なお、我が国のセメント業界では、他産業から多量の廃棄物・副産物を受け入れ、セメントの原料代替として再資源化しているため、炭酸塩起源以外の CaO、MgO がクリンカ中に含まれている。この CaO、MgO は石灰石の焼成段階を経ておらず、クリンカ生産の段階で CO_2 を排出していないことから、廃棄物等由来の CaO、MgO を控除した炭酸塩起源のクリンカ中 CaO、MgO 含有率を求め、排出係数を設定する必要がある。

以上より、セメント製造に伴う CO_2 の排出係数設定式は、以下のとおりとなる。

$$EF = EF_{\mathrm{CaO}} + EF_{\mathrm{MgO}}$$

EF ：改訂後の CO_2 排出係数
$EF_{_\mathrm{CaO}}$ ：$CaCO_3$ 由来 CO_2 排出係数（下式により設定）
$EF_{_\mathrm{MgO}}$ ：$MgCO_3$ 由来 CO_2 排出係数（下式により設定）

$$EF_{\mathrm{CaO}} = \left(CaO_{\mathrm{Cl}} - CaO_{\mathrm{Cl-Waste}}\right) \times 0.785$$

$$CaO_{\mathrm{Cl-Waste}} = \frac{W_{\mathrm{dry}} \times CaO_{\mathrm{Waste}}}{M}$$

CaO_{Cl} ：クリンカ中 CaO 含有率
$CaO_{\mathrm{Cl\text{-}Waste}}$ ：クリンカ中 CaO 含有率（廃棄物等由来）
0.785 ：CaO と CO_2 の分子量比
W_{dry} ：廃棄物等投入量（乾重量）
CaO_{Waste} ：廃棄物等原料中 CaO 含有率
M ：クリンカ生産量

$$EF_{\mathrm{MgO}} = \left(MgO_{\mathrm{Cl}} - MgO_{\mathrm{Cl-Waste}}\right) \times 1.092$$

$$MgO_{Cl-Waste} = \frac{W_{dry} \times MgO_{Waste}}{M}$$

MgO_{Cl} ：クリンカ中 MgO 含有率
$MgO_{\mathrm{Cl\text{-}Waste}}$ ：クリンカ中 MgO 含有率（廃棄物等由来）
1.092 ：MgO と CO_2 の分子量比
W_{dry} ：廃棄物等投入量（乾重量）
MgO_{Waste} ：廃棄物等原料中 MgO 含有率
M ：クリンカ生産量

各パラメータの設定方法詳細は、以下のとおりである。

① 原料工程で投入された廃棄物等乾重量

算定に使用する廃棄物等の種類として、石炭灰（焼却残さ）、下水汚泥焼却灰、一般ごみ焼却灰、ガラスくず・陶磁器くず、コンクリートくず、高炉スラグ（水砕）、高炉スラグ（徐冷）、製鋼スラグ、非鉄鉱さい、鋳物砂、ばいじん･ダスト、石炭灰（流動床灰）、石炭灰（集塵機捕集ダスト）、の 13 種類が選定されている（これらの廃棄物による廃棄物等由来 CaO のカバー率は 90%以上、MgO のカバー率は 80%以上。）。廃棄物量（排出ベース）及び各廃棄物等における含水率（表 1 参照）はセメント協会調査より把握している（2000 年度以降のみ）。

表 1　廃棄物等由来原料の組成

大分類	種類	含水率	CaO 含有率	MgO 含有率
燃え殻（焼却残渣）	石炭灰	7.2～19.5%	5.0～5.8%	1.0～1.1%
	下水汚泥焼却灰※	7.2～17.8%	7.4～12.5%	3.5～3.8%
	一般ごみ焼却灰※	15.6～24.6%	10.0～26.5%	2.6～2.8%
ガラスくず、コンクリートくず及び陶磁器くず	ガラスくず・陶磁器くず※	12.1～32.7%	17.5～31.1%	1.0～2.5%
	コンクリートくず※	0～37.5%	6.4～43.9%	1.0～1.1%
鉱さい	高炉スラグ（水砕）	1.9～16.9%	40.0～42.4%	4.7～5.8%
	高炉スラグ（徐冷）	5.5～16.4%	40.8～41.5%	6.1～6.5%
	製鋼スラグ	7.7～14.7%	34.8～40.5%	2.0～3.0%
	非鉄鉱さい	2.6～8.4%	6.4～10.0%	1.1～1.5%
	鋳物砂※	9.6～14.0%	6.5%	1.3～1.6%
ばいじん類（集塵機捕集ダスト）	ばいじん、ダスト	8.9～15.7%	9.0～13.4%	1.2～1.5%
	石炭灰（流動床灰）※	0.1～3.2%	14.5～20.7%	0.7～0.9%
	石炭灰	1.0～3.9%	4.1～5.0%	1.0～1.1%

（出典）セメント協会提供データ　※上記数値は 1990 年度から直近年度までの最小値及び最大値

② クリンカ中の廃棄物等由来の CaO 含有量、CaO 含有率、MgO 含有量、MgO 含有率

種類別廃棄物等乾重量に、セメント協会調査による種類別の廃棄物等中の CaO、MgO 含有率（表 1 参照）をそれぞれ乗じてクリンカ中の廃棄物等由来の CaO、MgO の総量をそれぞれ算出し、クリンカ生産量で除してクリンカ中の廃棄物等由来 CaO 含有率、MgO 含有率を設定している。CaO 含有率については、1999 年度以前のデータが入手できないため、2000～2003 年度の平均値を用い、MgO 含有率については、2006 年度以前のデータが入手できないため、2007～2009 年度の平均値を用いている。

③ 廃棄物等由来の CaO、MgO を除いたクリンカ中の CaO 含有率、MgO 含有率

セメント協会調査によるクリンカ中の平均 CaO 含有率､MgO 含有率から廃棄物等由来の CaO 含有率、MgO 含有率をそれぞれ差し引き、排出係数の設定に使用するクリンカ中の CaO 率、MgO 率をそれぞれ設定している。

$CaCO_3$ 及び $MgCO_3$ 由来 CO_2 排出係数と、各々の算出に使用した各パラメータの推移を表 2、表 3 に、更に両者を合計した最終的に排出量算定に使用する CO_2 排出係数の推移を表 4 に示す。

表 2　$CaCO_3$ 由来の CO_2 排出係数

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
クリンカ中平均 CaO含有率	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9
クリンカ中廃棄物由来のCaO含有率	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6	2.6
廃棄物を排除した純クリンカ中CaO含有率	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3	63.3
CO_2/CaO	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785
排出係数	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
クリンカ中平均 CaO含有率	66.0	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.9	65.8
クリンカ中廃棄物由来のCaO含有率	2.9	2.6	2.5	2.3	2.1	2.0	2.0	2.0	1.9	1.7
廃棄物を排除した純クリンカ中CaO含有率	63.0	63.3	63.4	63.6	63.7	63.9	63.9	63.8	63.9	64.1
CO_2/CaO	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785
排出係数	0.495	0.497	0.498	0.499	0.500	0.501	0.501	0.501	0.502	0.503

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
クリンカ中平均 CaO含有率	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8
クリンカ中廃棄物由来のCaO含有率	1.7	2.0	1.8	1.7	1.6	1.6	1.6	1.7	1.8	1.8
廃棄物を排除した純クリンカ中CaO含有率	64.1	63.7	64.0	64.1	64.1	64.2	64.1	64.1	64.0	64.0
CO_2/CaO	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785
排出係数	0.503	0.500	0.502	0.503	0.503	0.504	0.503	0.503	0.502	0.502

	2020	2021	2022	2023	2024
クリンカ中平均 CaO含有率	65.8	65.8	65.8	65.8	65.8
クリンカ中廃棄物由来のCaO含有率	1.6	1.6	1.6	1.7	1.7
廃棄物を排除した純クリンカ中CaO含有率	64.2	64.2	64.2	64.1	64.1
CO_2/CaO	0.785	0.785	0.785	0.785	0.785
排出係数	0.504	0.504	0.503	0.503	0.503

表 3　$MgCO_3$ 由来の CO_2 排出係数

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
クリンカ中平均 MgO含有率	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
クリンカ中廃棄物由来のMgO含有率	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
廃棄物を排除した純クリンカ中MgO含有率	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
CO_2/MgO	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092
排出係数	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
クリンカ中平均 MgO含有率	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
クリンカ中廃棄物由来のMgO含有率	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
廃棄物を排除した純クリンカ中MgO含有率	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
CO_2/MgO	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092
排出係数	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
クリンカ中平均 MgO含有率	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
クリンカ中廃棄物由来のMgO含有率	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
廃棄物を排除した純クリンカ中MgO含有率	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0
CO_2/MgO	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092
排出係数	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011

	2020	2021	2022	2023	2024
クリンカ中平均 MgO含有率	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
クリンカ中廃棄物由来のMgO含有率	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
廃棄物を排除した純クリンカ中MgO含有率	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
CO_2/MgO	1.092	1.092	1.092	1.092	1.092
排出係数	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012

表 4　セメント製造における CO_2 排出係数［kg-CO_2/t-clinker］

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
$CaCO_3$由来	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497
$MgCO_3$由来	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
合計	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
$CaCO_3$由来	0.495	0.497	0.498	0.499	0.500	0.501	0.501	0.501	0.502	0.503
$MgCO_3$由来	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011	0.011
合計	0.505	0.508	0.508	0.510	0.511	0.512	0.513	0.512	0.513	0.514

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
$CaCO_3$由来	0.503	0.500	0.502	0.503	0.503	0.504	0.503	0.503	0.502	0.502
$MgCO_3$由来	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.011	0.011
合計	0.514	0.511	0.514	0.514	0.515	0.516	0.515	0.515	0.514	0.514

	2020	2021	2022	2023	2024
$CaCO_3$由来	0.504	0.504	0.503	0.503	0.503
$MgCO_3$由来	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
合計	0.515	0.515	0.515	0.515	0.515

2.3 活動量

活動量には、セメント協会提供データによるクリンカ生産量を使用する。ただし、1990～1999 年度は未把握のため、2000～2003 年度におけるクリンカ生産量と「窯業・建材統計年報（経済産業省）」に示された石灰石消費量の比率の平均値により外挿推計する。

なお、「窯業・建材統計年報」では、1993～2003 年度の石灰石消費量には、セメント系固化材原料用が含まれる一方、1992 年度以前の石灰石消費量には含まれていない。したがって、時系列の一貫性の保持及びセメント系固化材用途も含めたクリンカ生産量推計のため、「窯業・建材統計年報」において示されている接続係数（0.99）を用いて 1990～1992 年度における固化材原料用を含めたセメント生産量を算出し（= セメント生産量/0.99）、さらに、石灰石消費量とセメント生産量との比率（= 石灰石消費量/セメント生産量）を乗じて石灰石消費量を算出している。補正前後の石灰石消費量の推移は表 5 のとおりである。

表 5　補正前後の石灰石消費量の推移［千 t］

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
石灰石消費量(補正前) (セメント系固化材含まない)	91,583	95,369	98,649	-	-	-	-	-	-	-
石灰石消費量(補正後) (セメント系固化材含む)	92,511	96,345	99,392	98,441	100,898	100,632	101,524	95,242	84,356	83,429

	2000	2001	2002	2003
石灰石消費量(補正前) (セメント系固化材含まない)	-	-	-	-
石灰石消費量(補正後) (セメント系固化材含む)	83,979	80,750	77,818	76,232

※石灰石消費量は 1990～1999 年度のクリンカ生産量推計に使用。
※緑色の網掛け部分が補正を行った箇所。
（出典）窯業・建材統計年報（経済産業省）

石灰石消費量による外挿推計で補間を行った 1990 年度以降の全時系列におけるクリンカ生産量は表 6 に示すとおりとなる。

表 6　活動量（クリンカ生産量）の推移［千 t］

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
クリンカ生産量	76,253	79,495	82,094	81,224	83,338	83,032	83,855	78,666	69,675	68,980

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
クリンカ生産量	69,528	67,729	63,778	62,653	61,202	63,003	62,404	59,885	55,647	49,195

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
クリンカ生産量	47,279	48,884	49,883	52,105	51,573	50,307	50,436	51,351	50,979	49,293

	2020	2021	2022	2023	2024
クリンカ生産量	47,522	47,338	43,650	40,316	39,193

（出典）2000 年度以降：セメント協会提供データ
1990～1999 年度：窯業・建材統計年報（経済産業省）、セメント協会提供データを基に推計

3．算定方法の時系列変更・改善経緯

表 7　初期割当量報告書（2006 年提出）以降の算定方法等の改訂経緯概要

	2011 年提出	2015 年提出
排出・吸収量算定式	－	－
排出係数	排出係数の設定に使用している廃棄物等原料種を 7 種から 13 種に拡大。	$CaCO_3$ 由来 CO_2 排出係数と同様の設定方法により、$MgCO_3$ 由来の CO_2 排出係数を新たに設定。
活動量	－	－

（1）初期割当量報告書における算定方法

1）排出・吸収量算定式

現行の算定式と同様。

2）排出係数

現行の排出係数と同様、廃棄物等由来の CaO を控除した炭酸塩起源のクリンカ中 CaO 含有率を求め、CaO と CO_2 の分子量比（0.785）を乗じて $CaCO_3$ 由来の CO_2 排出係数を求めていた。

なお、現行の設定方法と異なり、MgO 由来の CO_2 排出係数は設定されていなかった。また、設定に考慮されている廃棄物等の種類は「石炭灰（焼却残渣）」、「高炉スラグ（水砕）」、「高炉スラグ（徐冷）」、「製鋼スラグ」、「非鉄鉱さい」、「石炭灰（集塵機捕集ダスト）」及び「ばいじん・ダスト」の 7 種類のみであった。

3）活動量

現行の活動量と同様。

（2）2011 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

初期割当量報告書における算定式と同様（現行の算定式と同様）

2）排出係数

排出係数の設定に使用されている廃棄物等原料種について、調査対象範囲が拡大された結果、

従来の 7 種に加え、「下水汚泥焼却灰」、「一般ごみ焼却灰」、「ガラスくず・陶磁器くず」、「コンクリートくず」、「鋳物砂」及び「石炭灰（流動床灰）」の 6 種が追加され、合計 13 種とされた。

表 8　変更前後の排出係数［kg-CO_2/t-clinker］

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
変更前	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498	0.498
変更後	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
変更前	0.495	0.498	0.499	0.500	0.501	0.502	0.503	0.502	0.503
変更後	0.495	0.497	0.498	0.499	0.500	0.501	0.501	0.501	0.502

（出典）共にセメント協会提供データを基に設定。
変更前：排出係数の設定に使用している廃棄物等原料種が 7 種
変更後：排出係数の設定に使用している廃棄物等原料種が 13 種

3）活動量

初期割当量報告書における活動量と同様（現行の活動量と同様。）。

（3）2015 年提出インベントリにおける算定方法

1）排出・吸収量算定式

初期割当量報告書における算定式と同様（現行の算定式と同様。）。

2）排出係数

セメント製造以外での石灰石の使用に伴う CO_2 排出量については、$CaCO_3$ 及び $MgCO_3$ 由来の CO_2 排出量を算定しているが、セメント製造からの CO_2 排出量の算定においては $CaCO_3$ 由来の CO_2 排出量のみを対象としていた。そこで、他の排出源との整合性を図るため、セメント協会より新たに提供を受けたクリンカ及び廃棄物等原料中の MgO 含有率データを基に、$CaCO_3$ 由来 CO_2 排出係数と同様の設定方法により、$MgCO_3$ 由来の CO_2 排出係数を新たに算出し、$CaCO_3$ 及び $MgCO_3$ の両方に由来する CO_2 排出係数へと改訂が行われた（現行の算定方法と同様。）。

表 9　変更前後の CO_2 排出係数［kg-CO_2/t-clinker］

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
変更前	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497	0.497
変更後	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508	0.508

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
変更前	0.495	0.497	0.498	0.499	0.500	0.501	0.501	0.501	0.502	0.503
変更後	0.505	0.508	0.508	0.510	0.511	0.512	0.513	0.512	0.513	0.514

	2010	2011	2012
変更前	0.503	0.500	0.502
変更後	0.514	0.511	0.514

（出典）共にセメント協会提供データを基に設定。
変更前：$CaCO_3$ 由来の CO_2 排出係数
変更後：$CaCO_3$ 及び $MgCO_3$ 由来の CO_2 排出係数

3）活動量

初期割当量報告書における活動量と同様（現行の活動量と同様。）。