

第3回 東京都使用済太陽光発電設備リサイクル検討会

「太陽電池モジュールの環境リスクに関する検討事例」

2019年7月9日

みずほ情報総研株式会社

グローバルイノベーション&エネルギー部

河本 桂一

構成

○ IEA PVPS Task12: PV Sustainabilityにおける検討事例

- ・ IEA PVPSの概略
- ・ IEA PVPS Task12: PV Sustainabilityの概略
- ・ IEA PVPS Task12: PV Sustainabilityにおける検討事例
 - Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 太陽電池モジュールの溶出試験に関する事例

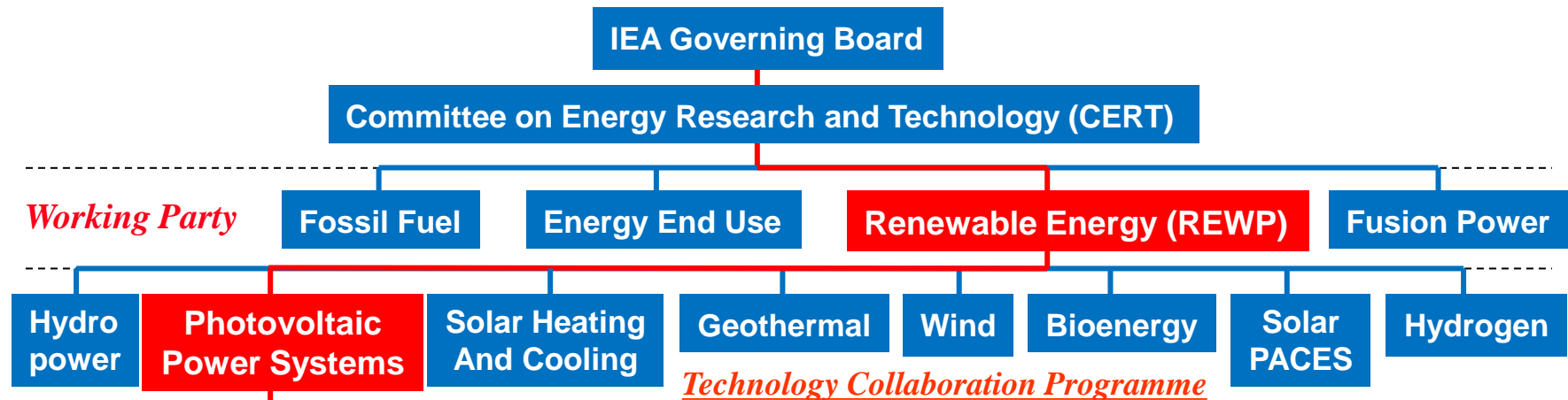
- ・ 日本における太陽電池モジュール溶出試験の実施例
- ・ 太陽電池モジュール溶出試験の検体作成方法の検討例

○ (参考)海外における環境関連動向

IEA PVPSの概略

IEA PVPS: Photovoltaic Power Systems *Technology Collaboration Programme*

Mission: to enhance the international collaborative efforts which facilitate the role of photovoltaic solar energy as a cornerstone in the transition to sustainable energy systems



- *Task 1 Strategic PV Analysis and Outreach*
- *Task 12 PV Environmental, Health & Safety Activities / PV Sustainability*
- *Task 13 Performance and Reliability of Photovoltaic Systems*
- *Task 14 High Penetration of PV Systems in Electricity Grids*
- *Task 15 Enabling Frameworks for the Development of BIPV*
- *Task 16 Solar resource for high penetration and large scale applications*
- *Task 17 PV and Transport*
- *Task 18 Off-Grid and Edge-of-Grid Photovoltaic Systems*

IEA PVPS参加国(27ヶ国+5機関)



Australia



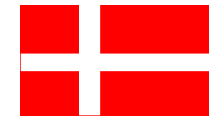
Austria



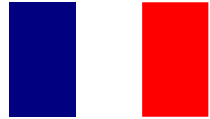
Canada



China



Denmark



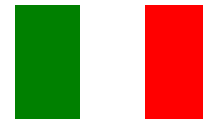
France



Germany



Israel



Italy



Japan



EC



Korea



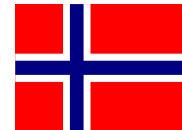
Malaysia



Mexico



The Netherlands



Norway



Portugal



Spain



Switzerland



Sweden



Turkey



USA



Finland



Belgium



Thailand



South Africa



Chile



Morocco



Copper Alliance™

○ 構成

Subtask 1: Recycling

Subtask 2: LCA

Subtask 3: Other sustainability topics

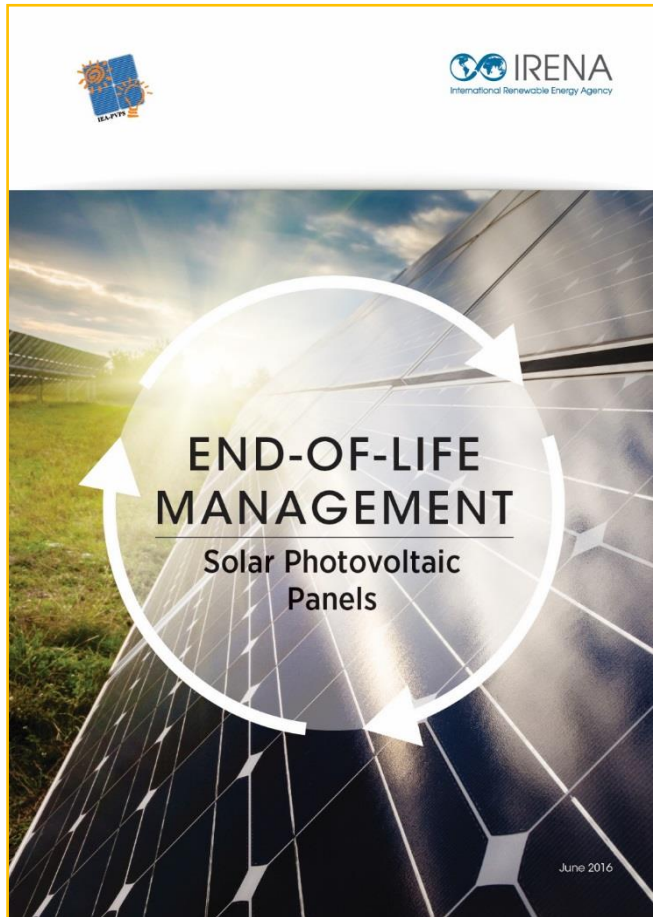
○ 参加国

米国（議長国）、日本、中国、韓国、オーストラリア、オーストリア、ベルギー、フランス、ドイツ、オランダ、スペイン、スウェーデン、スイス、SolarPower Europe

IEA PVPS Task12: PV Sustainability

○ Subtask 1: Recycling

＜リサイクル政策動向・見通し＞



＜リサイクル技術開発動向＞

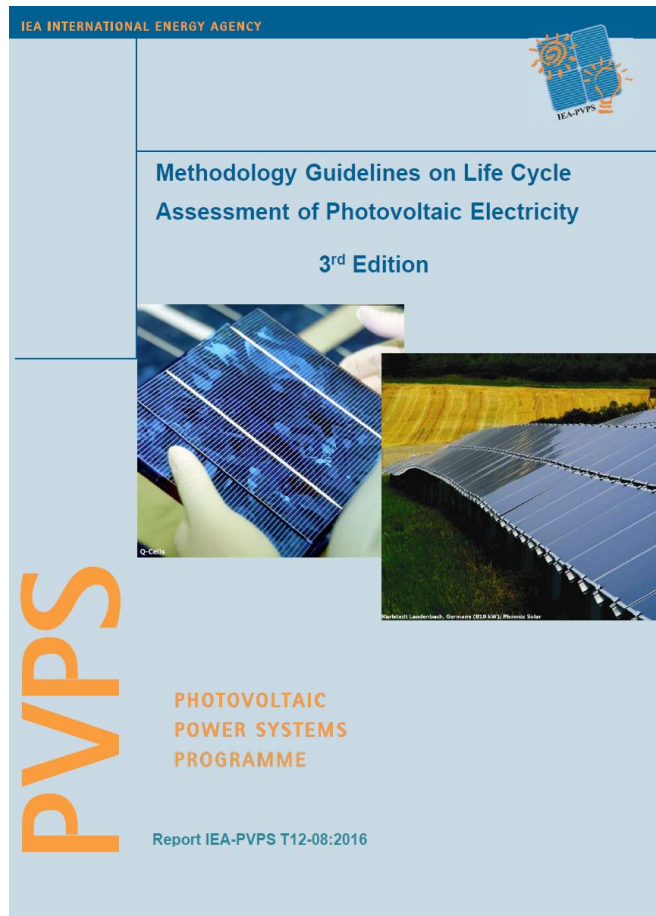


※ IEA PVPS website (<http://www.iea-pvps.org>) よりダウンロード可能

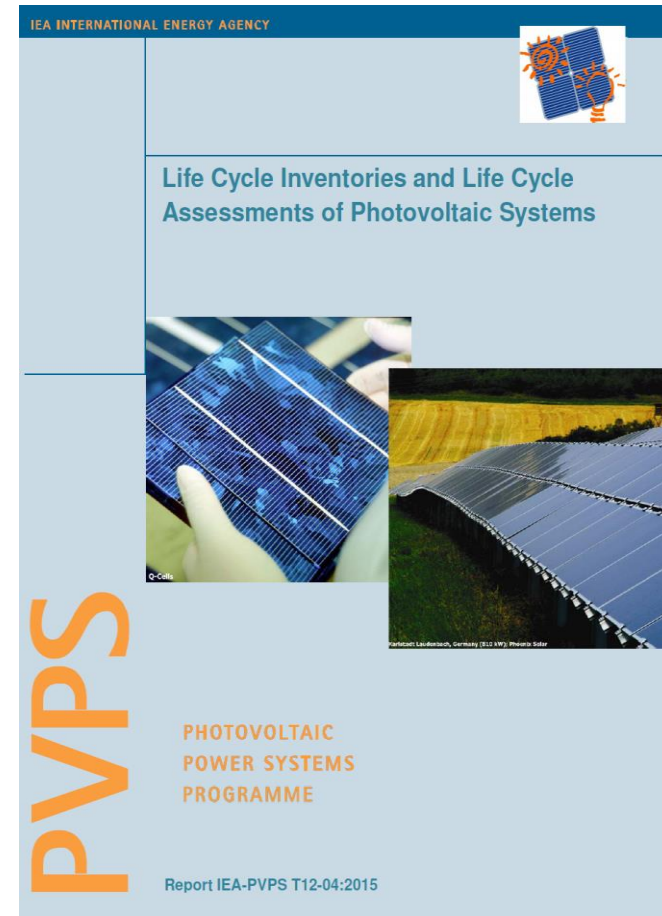
IEA PVPS Task12: PV Sustainability

○ Subtask 2: LCA

<LCAガイドライン>



<LCIデータ集>



※ IEA PVPS website (<http://www.iea-pvps.org>) よりダウンロード可能

IEA PVPS Task12: PV Sustainability

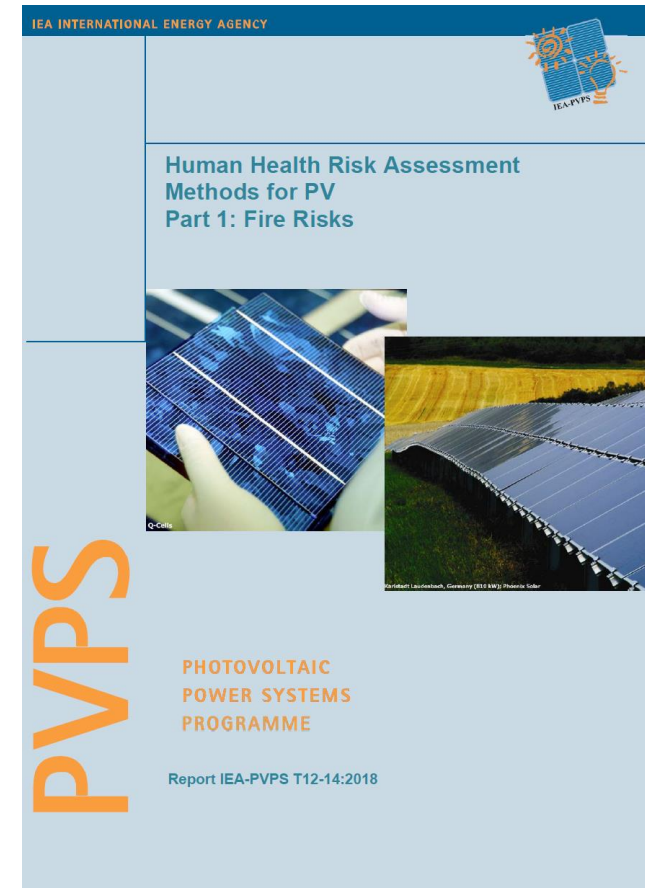
○ Subtask 3: Other sustainability topics

＜Human Health Risk Assessment (HHRA) Methods for PV:
健康リスクに関する評価手法検討＞

- Part 1: Fire Risks (2018年)
- Part 2: Breakage Risks (2019年予定)
- Part 3: Disposal Risks (2020年予定)

= 編著者 =

- P. Sinha (First Solar, USA)
- G. Heath (NREL, USA)
- A. Wade (SolarPower Europe)
- K. Komoto (MHIR, Japan)



※ IEA PVPS website (<http://www.iea-pvps.org>) よりダウンロード可能

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 背景・目的

- ・太陽光発電が設置された建物で火災が生じた際に、太陽電池モジュールに含まれる有害物質の飛散等による影響・リスクが懸念される。
- ・既存評価モデルを用いて、火災発生時に想定される太陽電池モジュール中の有害物質挙動をシミュレーションし、大気への飛散量・濃度、吸入リスクを評価する。
- ・消火水、雨水による土壌(地面)への沈積、地中への拡散量・濃度を評価する。

○ アプローチ

- ・評価対象モジュール(対象有害物質)
 - 結晶Si(Pb)、CdTe(Cd)、CIS(Se)
- ・大気への飛散に関する評価
 - USEPA Gaussian plume model: SCREEN3
- ・地中への拡散に関する評価
 - Dilution-Attenuation Factor (DAF) アプローチ(USEPA推奨)

Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 前提条件(建物、火災、消火水・雨水)

		建物規模			(単位)
		Small	Medium	Large	
建物規模	敷地面積	1,000	3,400	10,900	m ²
	屋根面積	100	2,500	10,000	m ²
	屋根寸法	10 × 10	50 × 50	100 × 100	m
	建物高さ	4	4	4	m
火災	熱流速	50	50	50	kW/m ²
	熱放出速度	5.00E+06	1.25E+08	5.00E+08	J/s
消火水・雨水	消火水	1,000	25,000	100,000	L
	雨水	79	79	79	cm/年

Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 前提条件(太陽電池モジュール)

		建物規模			(単位)
		Small	Medium	Large	
建物規模	屋根面積	100	2,500	10,000	m ²
結晶Si	モジュール面積	1.6			m ² /枚
	モジュール枚数	63	1,563	6,250	枚/建物
	Pb含有量	13			g/枚
	Pb放出率	(大気)4.6/(消火水)0.016			%
CdTe	モジュール面積	0.72			m ² /枚
	モジュール枚数	139	3,472	13,889	枚/建物
	Cd含有量	6			g/枚
	Cd放出率	(大気)0.5/(消火水)0.01			%
CIS	モジュール面積	1.2			m ² /枚
	モジュール枚数	83	2,083	8,333	枚/建物
	Se含有量	5			g/枚
	Se放出率	(大気)0.1/(消火水)0.17			%

Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 前提条件 (Screening level: 大気中濃度)

Cd	AEGLs (Access Acute Exposure Guideline Levels) : U.S. EPA	<ul style="list-style-type: none"> ・急性曝露ガイドラインレベル: 有害性物質の公衆に対する閾値濃度。 ・National Advisory Committee for the Development of Acute Exposure Guideline Levels for Hazardous Substances (AEGL Committee)により策定。 ・気体あるいは揮発性物質を主体とした急性毒性物質を対象とし、工場の爆発・火災などの事故や自然災害、あるいは事件によって大気中に放出された有害物質の短期曝露による健康被害に対する対応を構築する根拠。 ・5つの曝露時間(10分、30分、1時間、4時間、8時間)のそれぞれに対し想定される健康被害を3段階のレベル(低濃度からAEGL-1、AEGL-2、AEGL-3)に分類。
	: AEGL-1	いわゆる「不快レベル」で、感受性の高いヒトも含めた公衆に著しい不快感や、兆候や症状の有無にかかわらず可逆的影響を増大させる空気中濃度閾値。これらの影響は、身体の障害にはならず一時的で曝露の中止により回復。
	: AEGL-2	いわゆる「障害レベル」で、公衆に避難能力の欠如や不可逆的あるいは重篤な長期影響の増大が生ずる空気中濃度閾値。
	: AEGL-3	いわゆる「致死レベル」で、公衆の生命が脅かされる健康影響、すなわち死亡の増加が生ずる空気中濃度閾値。
Pb、Se	PAC (Proactive Action Criteria) : U.S. DOE	<ul style="list-style-type: none"> ・AEGLやERPGが設定されていない物質について、独自の手法で相当値 Temporary Emergency Exposure Limits (TEELs) を導出。 ・暴露時間の想定は60分。
	: PAC-1~3	それぞれ、AEGL-1~3に相当。

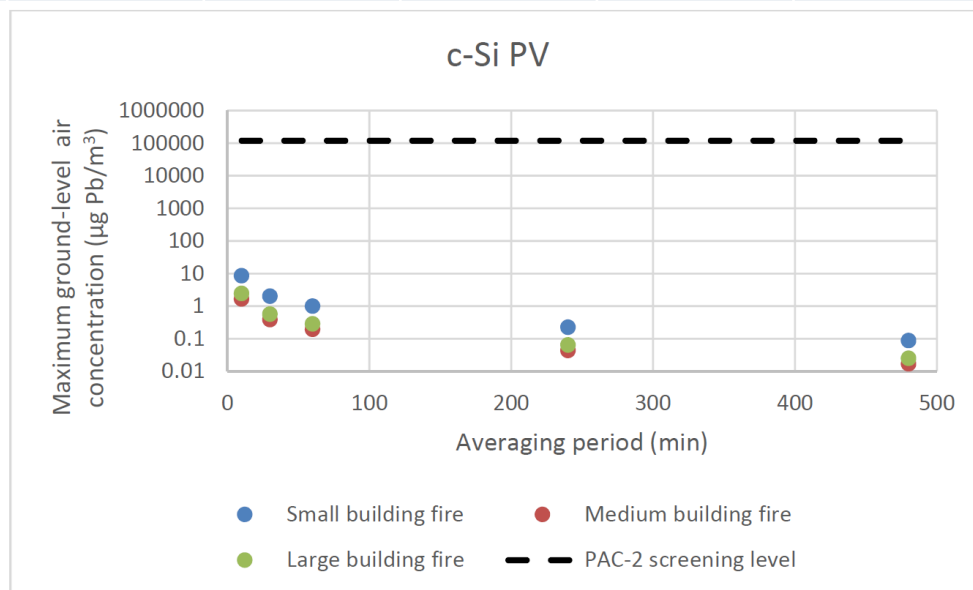
※ AEGLsの日本語説明は、国立医薬品食品衛生研究所 (NIHS)によるAEGL情報(翻訳版: <http://www.nihs.go.jp/hse/chem-info/aegl/agnote.pdf>)より。

Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(大気中への飛散濃度): 結晶Si(Pb)

		経過時間(分)					(単位)
		10	30	60	240	480	
Pb飛散濃度 (建物規模別)	Small	9	2.0	1.0	0.23	0.09	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Medium	2	0.4	0.2	0.04	0.02	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Large	2	0.6	0.3	0.1	0.02	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Screening level	PAC-1	150	150	150	150	150	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PAC-2	120,000	120,000	120,000	120,000	120,000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PAC-3	700,000	700,000	700,000	700,000	700,000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

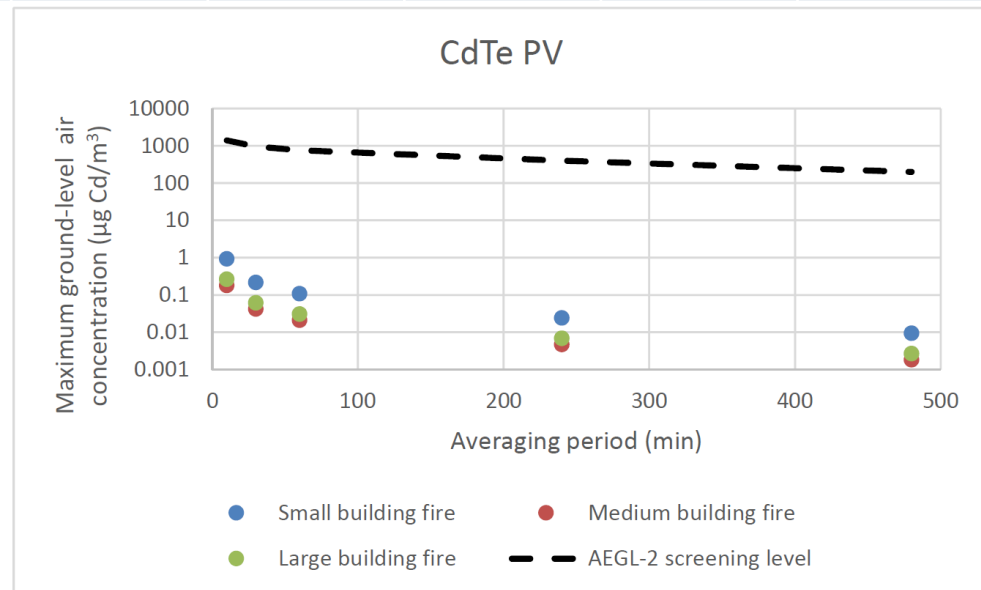


Ref) IEA PVPS Task12,
Human Health Risk
Assessment Methods
for PV Part 1: Fire
Risks, Report IEA-
PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(大気中への飛散濃度): CdTe(Cd)

		経過時間(分)					(単位)
		10	30	60	240	480	
Cd飛散濃度 (建物規模別)	Small	1	0.2	0.1	0.02	0.01	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Medium	0.2	0.04	0.02	0.005	0.002	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Large	0.3	0.06	0.03	0.007	0.03	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Screening level	AEGL-1	130	130	100	63	41	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	AEGL-2	1,400	960	760	400	200	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	AEGL-3	8,500	5,900	4,700	1,900	930	$\mu\text{g}/\text{m}^3$

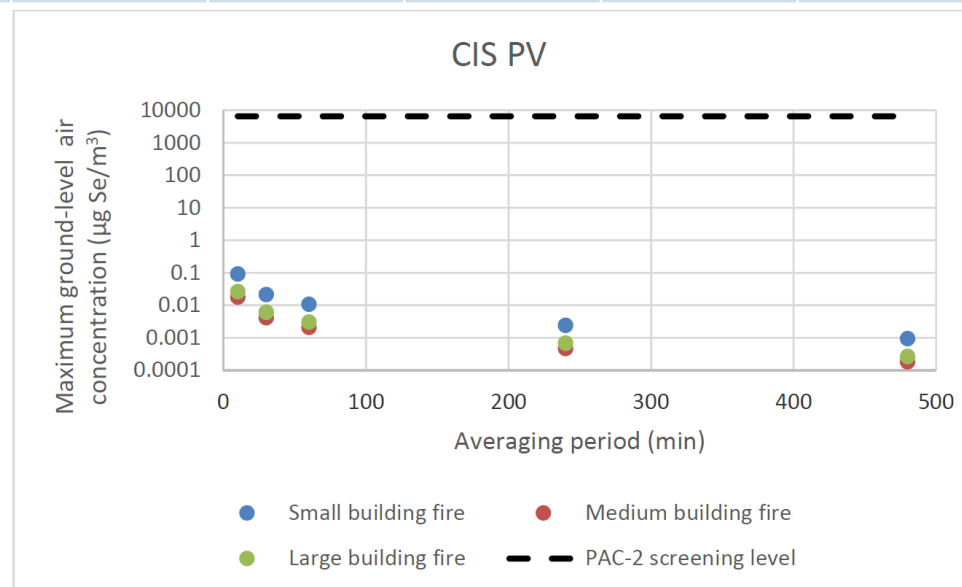


Ref) IEA PVPS Task12,
Human Health Risk
Assessment Methods
for PV Part 1: Fire
Risks, Report IEA-
PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(大気中への飛散濃度): CIS(Se)

		経過時間(分)					(単位)
		10	30	60	240	480	
Se飛散濃度 (建物規模別)	Small	0.09	0.02	0.01	0.002	0.001	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Medium	0.02	0.004	0.002	0.0005	0.0002	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Large	0.03	0.01	0.003	0.001	0.0003	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Screening level	PAC-1	600	600	600	600	600	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PAC-2	6,600	6,600	6,600	6,600	6,600	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	PAC-3	40,000	40,000	40,000	40,000	40,000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$



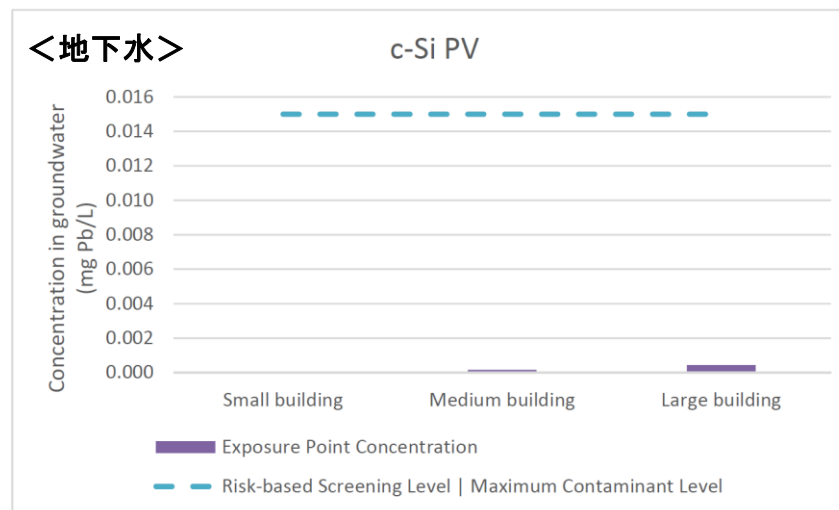
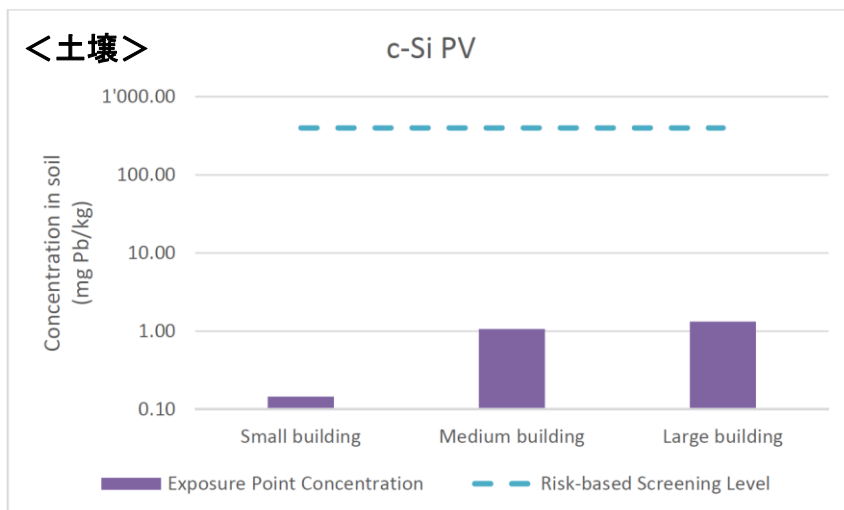
Ref) IEA PVPS Task12,
Human Health Risk
Assessment Methods
for PV Part 1: Fire
Risks, Report IEA-
PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(土壌・地下水への拡散濃度): 結晶Si(Pb)

		建物規模			(単位)
		Small	Medium	Large	
Pb拡散濃度	土壌	0.15	1.06	1.32	mg/kg
	地下水	7.3E-06	1.7E-04	4.4E-04	mg/L
Screening level※	土壌	400			mg/kg
	地下水	0.015			mg/L
	公共用水規制値	0.015			mg/L

※ Screening level: United States Environmental Protection Agency (USEPA), Regional Screening Levels (RSLs) - User's Guide, 2017



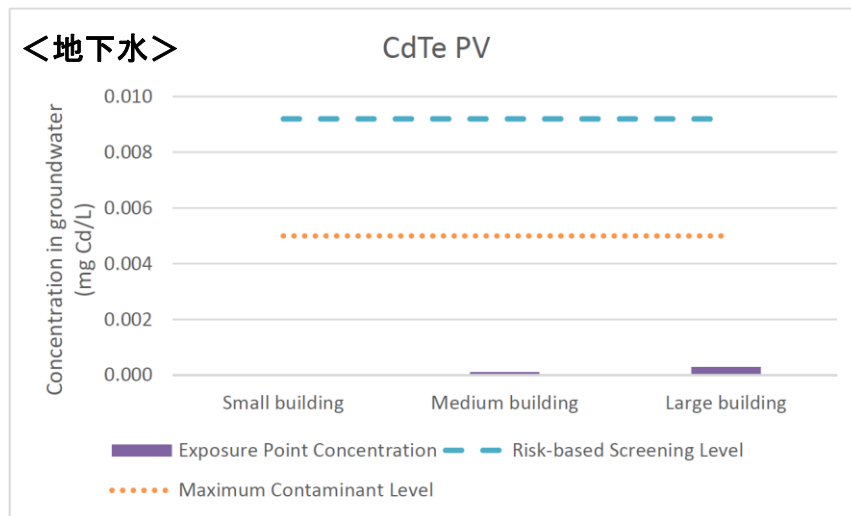
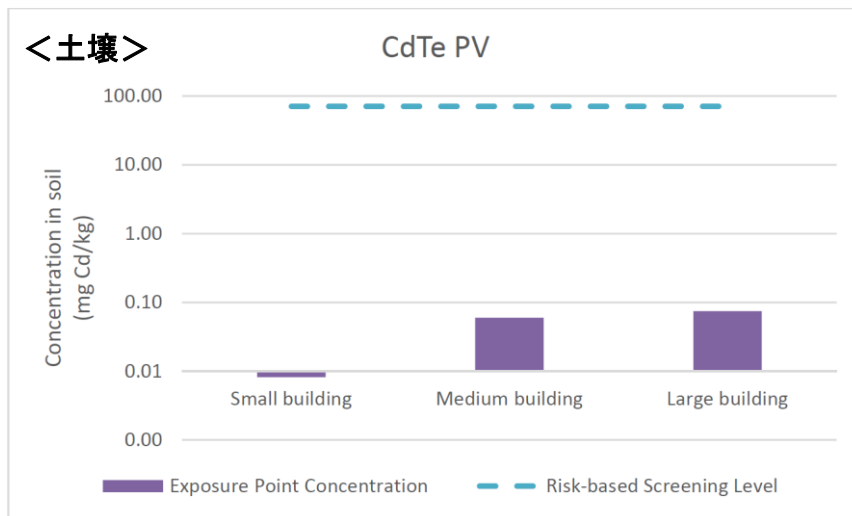
Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(土壌・地下水への拡散濃度): CdTe (Cd)

		建物規模			(単位)
		Small	Medium	Large	
Cd拡散濃度	土壌	0.01	0.06	0.07	mg/kg
	地下水	4.9E-06	1.1E-04	3.0E-04	mg/L
Screening level※	土壌	71			mg/kg
	地下水	0.0092			mg/L
	公共用水規制値	0.005			mg/L

※ Screening level: United States Environmental Protection Agency (USEPA), Regional Screening Levels (RSLs) - User's Guide, 2017



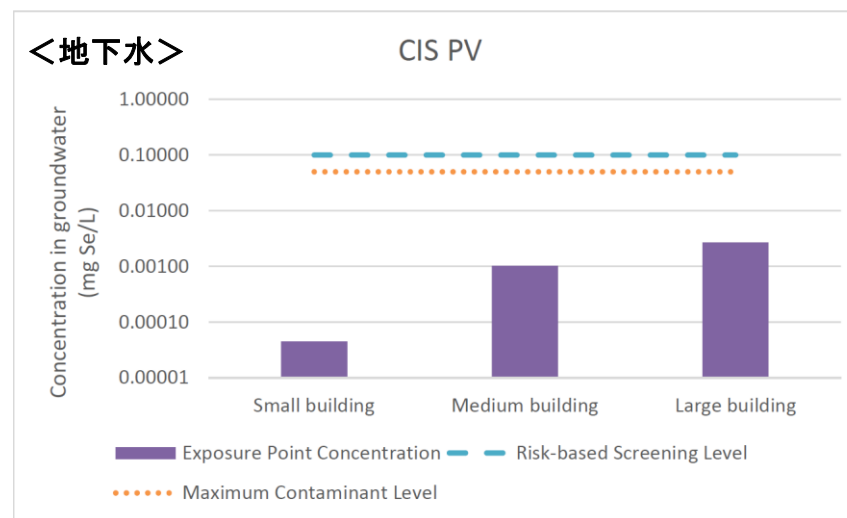
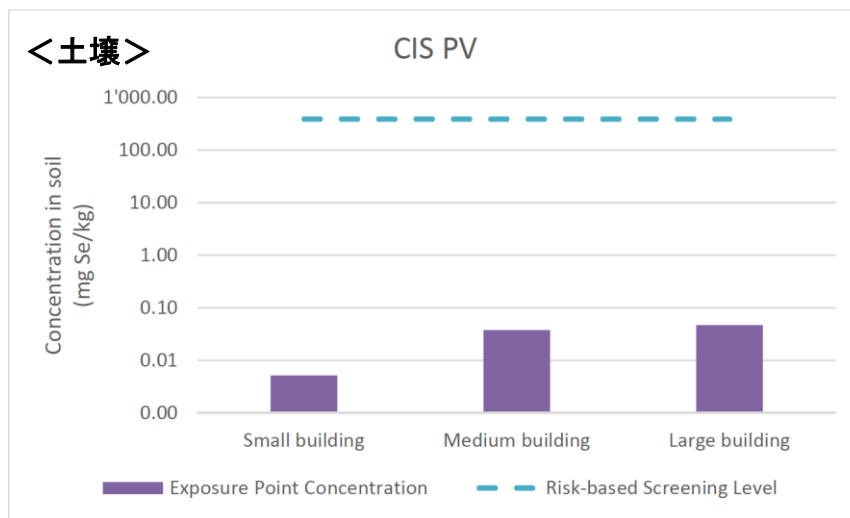
Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ 結果(土壌・地下水への拡散濃度): CIS(Se)

		建物規模			(単位)
		Small	Medium	Large	
Se拡散濃度	土壌	0.01	0.04	0.05	mg/kg
	地下水	4.49E-05	1.03E-03	2.69E-03	mg/L
Screening level※	土壌	390			mg/kg
	地下水	0.100			mg/L
	公共用水規制値	0.050			mg/L

※ Screening level: United States Environmental Protection Agency (USEPA), Regional Screening Levels (RSLs) - User's Guide, 2017



Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

Human Health Risk Assessment Methods for PV: (Part 1) Fire Risks

○ まとめ

- ・火災により生じ得る、結晶Si、CdTeおよびCIS太陽電池モジュールを起源とするPb、CdおよびSeの吸入による健康リスクはガイドラインに定められた閾値よりも小さい。
- ・Pb、CdおよびSeが消火水とともに地面に沈積し、土壌や地下水に拡散していくことによるリスクは、ガイドラインに定められた閾値よりも小さい。
- ・以上の結果は結晶Si、CdTeおよびCIS太陽電池モジュールに含有されるPb、CdおよびSeについての評価結果であり、様々な種類のモジュールや構成要素を対象としているものではない。
- ・幾つかの不確実性要因はあるものの、既存の評価手法、閾値を用いたScreeningは、太陽電池モジュールの健康リスクを評価する手法として有効である。

○ 不確実性要因

- ・大気中への飛散、吸入
 - モデルの特性(実現象の再現性)
 - 大気中への放出比率、建物規模・高さ・形状、熱流速等の仮定
 - 暴露時間の妥当性
- ・土壌、地下水への拡散
 - 評価期間(年)、影響範囲(広さ)の想定

Ref) IEA PVPS Task12, Human Health Risk Assessment Methods for PV Part 1: Fire Risks, Report IEA-PVPS T12-14: 2018

日本における太陽電池モジュール溶出試験の実施例

○ 環境庁告示第13号試験方法による溶出試験を実施

(環境省:平成25年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル促進調査委託業務報告書、平成26年3月)

・試験検体(<5mm)は手作業および粉砕にて調整

→分析試験方法は所定の手順に沿ったものであるが、試験検体の作成方法に確立した方法がなく、可能な限り手作業による分解・裁断を行った後に機械的に粉砕

・試験結果について、廃棄物処理法施行規則による燃え殻・ばいじん・鉱さい等の埋立処理の基準と比較

→Pb, Cd, As, Se:いずれも0.3 mg/L

日本における太陽電池モジュール溶出試験の実施例

○ 試験結果

- ・Pb, Cd, As, Se, Sb, Teの溶出が検出されたモジュールあり
- ・一部のモジュールでPb、Seの溶出量が基準値を超過
→Seについて追加試験の結果、基準を下回る
- ・試料調整方法、分析機関によって結果にバラつきが生じる可能性があり、評価に際しては注意が必要

		製造年	溶出量(mg/L)					検体数
			Pb	Cd	As	Se	Sb	
単結晶Si	国内	～1999	0.01～0.13	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	6
		2000～2009	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.04～0.09	6
		2010～	<0.01～0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01～0.12	9
	海外	2008～2013	<0.01～0.15	<0.01	<0.01	<0.01	0.04～0.09	9
多結晶Si	国内	2001～2005	<0.01～0.08	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01～0.19	12
		2012～	0.01～0.42	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01～0.07	6
	海外	2012～	<0.01～0.90	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01～0.17	15
薄膜Si	国内	2008～2013	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	9
化合物	国内・海外	2007～2013	<0.01	<0.01～0.13	<0.01	<0.01～1.1※	<0.01～0.06	9

※ 追加試験を実施したところ、Se溶出量について、a) 0.02～0.11 mg/L、b) 検出限界以下～0.01 mg/Lという結果。

Ref) 環境省：平成25年度使用済再生可能エネルギー設備のリユース・リサイクル促進調査委託業務報告書、平成26年3月より作成

太陽電池モジュール溶出試験の検体作成方法の検討例

○ 検体作成方法の例

・米国における検討事例より

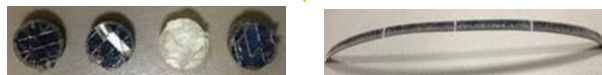
<Water jet>



<Mechanical coring>



<Strip cutting>



Ref) Electric Power Research Institute (EPRI), Solar PV Module End of Life: Options and Knowledge Gaps for Utility-Scale Plants, Technical Update Report, Dec. 2018

Ref) A. Patankar et al., Assessing Variability in Toxicity Testing of PV Modules, 46th IEEE-PVSC, Chicago, USA, Jun. 2019

太陽電池モジュール溶出試験の検体作成方法の検討例

○ 検体作成方法による溶出試験結果の比較例

- ・結晶Si太陽電池モジュールについて、作成方法が異なる検体(いずれも複数)について溶出試験を実施し、その結果を比較
- ・試験方法 : U.S. EPA Method 1311 TCLP
- ・暫定的な結論 : Water-jetによる検体は、試験結果のバラつきが小さい

< Mechanical >

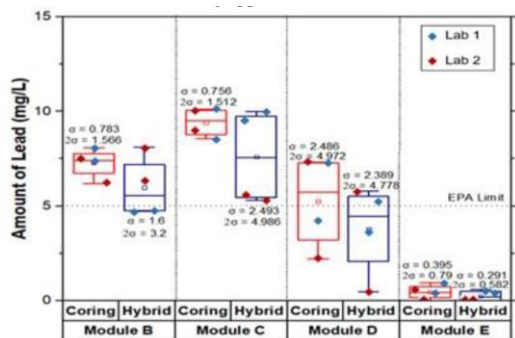


Fig. 1. Lead amount in modules of four different manufacturers for the mechanical approaches (4 samples per approach per module)

< Water-jet >

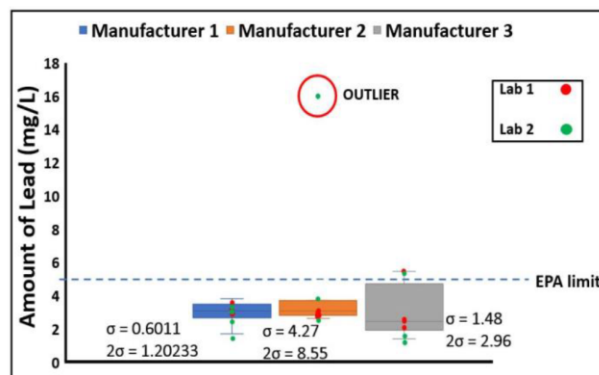


Fig.11 (a). Lead amount in modules of three different manufacturers for the waterjet approach with outliers (2 samples per module; 4 modules per manufacturer)

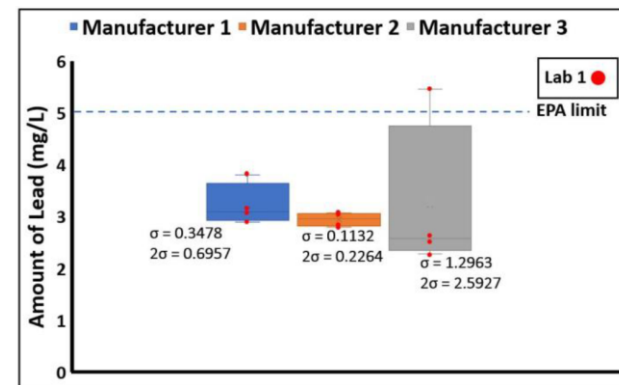


Fig.11 (b). Lead amount in modules of three different manufacturers for the waterjet approach without outliers (1 sample per module; 4 modules per manufacturer; only Lab 1)

Ref) A. Patankar et al., Assessing Variability in Toxicity Testing of PV Modules, 46th IEEE-PVSC, Chicago, USA, Jun. 2019

(参考)海外における環境関連動向

○ 欧 州

- ・WEEEにより太陽電池モジュールのリユース・リサイクルが義務化
- ・CENECELにより、使用後処理に関するStandardを策定(現時点で強制力はない)
- ・EUプロジェクトにより、太陽光発電システムのライフサイクル環境影響評価の方法論(評価ルール)を策定
- ・太陽光発電システムをEco-design、Eco-labelingの対象とする議論を実施中

○ 米 国

- ・SEIA(Solar Energy Industry Association)が「埋立廃棄物ゼロ」に向けた取り組みを実施中
- ・NSFが「Sustainability Leadership Standard for Photovoltaic Modules」を作成・公開
 - 太陽電池モジュールの様々な側面の情報開示を求め、達成状況によりランキングを行い、製造者による環境・持続性に配慮した製品の設計・製造、消費者による環境・持続性に配慮した製品の選択を促進
 - 現時点で強制力はないが、このstandardをベースに、太陽光発電をEPEATの対象とする議論を開始予定

終わりに

- 欧米を中心に、太陽光発電のライフサイクルを通じた環境影響・リスクの評価、使用後処理に関する様々な議論や取組みが実施されている。
- 太陽光発電の環境影響やリスク評価の決定版は存在しないが、クリーンな技術として、影響やリスクを最小限とするための継続的な取組みが必要である。
- 太陽光発電廃棄物の大量発生に備えるための取組みは各所で実施されているところであるが、短中期の移行期間における適切な指針(技術・制度等)を早期に整える必要がある。