

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Fuel cell technologies –

**Part 8-101: Energy storage systems using fuel cell modules in reverse mode –
Test procedures for the performance of solid oxide single cells and stacks,
including reversible operation**

Technologies des piles à combustible –

**Partie 8-101: Système de stockage de l'énergie utilisant des modules à piles
à combustible en mode inversé – Procédures d'essai pour la performance
des cellules élémentaires et des piles à oxyde solide, comprenant
le fonctionnement réversible**

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.070

ISBN 978-2-8322-7705-8

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	7
INTRODUCTION.....	9
1 Scope.....	10
2 Normative references	10
3 Terms, definitions, abbreviated terms and symbols.....	11
3.1 Terms and definitions.....	11
3.2 Abbreviated terms and symbols	17
3.2.1 Abbreviated terms	17
3.2.2 Symbols	17
3.3 Flow rates	21
4 General safety conditions	21
5 Test environment.....	22
5.1 General.....	22
5.2 Cell.....	23
5.3 Stack	23
5.4 Experimental set-up	24
5.4.1 General	24
5.4.2 Electrode gas control equipment.....	25
5.4.3 Thermal management equipment.....	25
5.4.4 Electric power supply/load control equipment	25
5.4.5 Measurement and data acquisition equipment	25
5.4.6 Safety equipment.....	25
5.4.7 Compression force control equipment.....	25
5.4.8 Pressure control equipment	25
5.5 Interface between test object and experimental set-up	26
5.6 Parameter control and measurement	27
5.7 Measurement uncertainty of TIPs and TOPs	28
5.8 Mounting of the test object into the experimental set-up.....	28
5.9 Stability criteria	29
6 Measurement instruments and methods.....	29
6.1 General.....	29
6.2 Instrument uncertainty	29
6.3 Recommended measurement instruments and methods.....	30
6.3.1 Electrode inlet gas flow rate measurement	30
6.3.2 Electrode gas composition measurement.....	30
6.3.3 Electrode gas temperature measurement.....	31
6.3.4 Electrode gas pressure measurement.....	31
6.3.5 Electrode exhaust gas flow rate measurement.....	31
6.3.6 Cell/stack assembly unit voltage measurement.....	32
6.3.7 Cell/stack assembly unit current measurement	32
6.3.8 Cell/stack assembly unit temperature measurement	32
6.3.9 Compression force measurement.....	32
6.3.10 Total impedance measurement.....	32
6.3.11 Ambient condition measurement.....	32
6.4 Test conditions and manufacturer recommendations	33
6.4.1 Start-up and shut-down conditions.....	33

6.4.2	Range of test conditions	33
6.4.3	Stabilization, initialization conditions and stable state	33
6.4.4	Dwell time, equilibration time, acquisition time	33
6.5	Data acquisition method	34
7	Test procedures and computation of results	34
7.1	General	34
7.2	Current-voltage characteristics test	34
7.2.1	Objective of this test	34
7.2.2	Test method	34
7.2.3	Data post-processing	35
7.3	Effective reactant utilization test	35
7.3.1	Objective of this test	35
7.3.2	Test method	35
7.3.3	Data post-processing	36
7.4	Durability test	36
7.4.1	Objective of this test	36
7.4.2	Test method	37
7.4.3	Data post-processing	37
7.5	Temperature sensitivity test	37
7.5.1	Objective of this test	37
7.5.2	Test method	38
7.5.3	Data post-processing	38
7.6	Separation of resistance components test via electrochemical impedance spectroscopy	39
7.6.1	Objective of this test	39
7.6.2	Test method	39
7.6.3	Data post-processing	40
7.7	Current cycling durability test	40
7.7.1	Objective of this test	40
7.7.2	Test method	41
7.7.3	Data post-processing	41
7.8	Thermal cycling test	41
7.8.1	Objective	41
7.8.2	Test method	41
7.8.3	Data post-processing	42
7.9	Pressurized test	42
7.9.1	Objective of this test	42
7.9.2	Test method	42
7.9.3	Data post-processing	43
8	Test report	43
8.1	General	43
8.2	Report items	43
8.3	Test unit data description	43
8.4	Test condition description	44
8.5	Test data description	44
8.6	Uncertainty evaluation	44
Annex A (normative)	Detailed test procedures	45
A.1	Test objective	45
A.2	Test set-up	45

A.3	Current-voltage characteristics test (7.2).....	46
A.3.1	Test input parameters (TIPs)	46
A.3.2	Test output parameters (TOPs).....	46
A.3.3	Derived quantities.....	47
A.3.4	Measurement of current-voltage characteristics	47
A.4	Effective reactant utilization test (7.3)	49
A.4.1	Test input parameters (TIPs)	49
A.4.2	Test output parameters (TOPs).....	51
A.4.3	Derived quantities.....	51
A.4.4	Measurement of effective reactant utilization	52
A.5	Durability test (7.4)	53
A.5.1	Test input parameters (TIPs)	53
A.5.2	Test output parameters (TOPs).....	53
A.5.3	Derived quantities.....	54
A.5.4	Measurement of durability.....	54
A.6	Temperature sensitivity test (7.5).....	55
A.6.1	Test input parameters (TIPs)	55
A.6.2	Test output parameters (TOPs).....	56
A.6.3	Derived quantities.....	56
A.6.4	Measurement of temperature sensitivity.....	57
A.7	Separation of resistance components test via electrochemical impedance spectroscopy (7.6)	58
A.7.1	Test input parameters (TIPs)	58
A.7.2	Test output parameters (TOPs).....	58
A.7.3	Derived quantities.....	59
A.7.4	Measurement of resistance components via EIS	59
A.7.5	Measuring range of frequencies.....	59
A.8	Current cycling durability test (7.7).....	60
A.8.1	Test input parameters (TIPs)	60
A.8.2	Test output parameters (TOPs).....	60
A.8.3	Derived quantities.....	61
A.8.4	Measurement of current cycling durability	61
A.9	Thermal cycling test (7.8).....	64
A.9.1	Test input parameters (TIPs)	64
A.9.2	Test output parameters (TOPs).....	65
A.9.3	Derived quantities.....	65
A.9.4	Measurement of thermal cycling	66
A.10	Pressurized test (7.9).....	68
A.10.1	Test input parameters (TIPs)	68
A.10.2	Test output parameters (TOPs).....	69
A.10.3	Derived quantities.....	69
A.10.4	Measurement of pressurized test.....	69
Annex B (informative)	Guidelines for electrochemical impedance spectroscopy (EIS)	71
B.1	General principles.....	71
B.2	EIS test equipment and set-up	72
B.3	Representation of results	73
B.4	Analysis and simulation of data.....	75
Annex C (normative)	Formulae for calculation of utilization values	76
C.1	Generic formulae	76

C.2	Degradation	76
C.3	Area-specific resistance (ASR)	77
C.4	Temperatures	77
	Bibliography.....	78
Figure 1	– Exploded schematic representation of a planar-type single cell test object consisting of a SOC in a cell housing	23
Figure 2	– Schematic representation of a planar-geometry SOC stack test object with N RU including supporting structure (top and bottom plates)	24
Figure 3	– Schematic representation of a test environment for a SOC cell/stack assembly unit.....	24
Figure 4	– Test environment with interfaces between SOC cell and experimental set-up.....	26
Figure 5	– Test environment with interfaces between SOC stack and experimental set-up	27
Figure A.1	– Qualitative representation of TIPs when carrying out a current-voltage characteristics test for combined (SOFC and SOEC) operation	48
Figure A.2	– Schematic representation of the current-voltage characteristics test procedure for two consecutive set points k and $k + 1$	48
Figure A.3	– Schematic representation of a J - V curve in both electrolysis and fuel cell modes.....	49
Figure A.4	– Qualitative representation of TIPs when carrying out an effective reactant utilization test varying the negative electrode reactant flow rate ($q_{V,neg,in}$), consisting of hydrogen and nitrogen	52
Figure A.5	– Qualitative representation of TIPs when carrying out a durability test (in galvanostatic mode).....	55
Figure A.6	– Qualitative representation of TIPs when carrying out a temperature sensitivity test.....	57
Figure A.7	– Qualitative representation of TIPs when carrying out a current cycling durability test	63
Figure A.8	– Current profile of a SOEC system with fast switch on/off at thermoneutral conditions	64
Figure A.9	– Current profile of a SOEC system with fast switch on/off at exothermal conditions	64
Figure A.10	– Current profile of a load-following SOEC system and thermoneutral conditions	64
Figure A.11	– Current profile of a load-following SOEC system and exothermal conditions	64
Figure A.12	– General evolution of TIPs during test: continuous thermal cycling above 600 °C (in this case with zero electric current)	67
Figure A.13	– General evolution of TIPs during test: thermal cycling below 600 °C with gas and current changes (coupling with operation at constant current for instance)	68
Figure B.1	– Input/output signals during electrochemical impedance spectroscopy (EIS) of a solid oxide fuel/electrolysis cell	72
Figure B.2	– Test set-up for electrochemical impedance spectroscopy of a planar solid oxide fuel cell/electrolysis stack with 5 RUs	73
Figure B.3	– Bode plot representing the modulus of impedance and phase angle against excitation frequency	74
Figure B.4	– Nyquist plot, representing conjugate imaginary part against real part of impedance	75

Table 1 – Symbols	18
Table 2 – Stability criteria for TIPs and TOPs as a reference	29
Table 3 – Instrument uncertainty for each quantity to be measured	30
Table A.1 – Test input parameters (TIPs) for current-voltage characteristics test	46
Table A.2 – Test output parameters (TOPs) for current-voltage characteristics test	47
Table A.3 – Derived quantities for current-voltage characteristics test	47
Table A.4 – Test input parameters (TIPs) for negative electrode reactant utilization test	50
Table A.5 – Test input parameters (TIPs) for positive electrode reactant utilization test	50
Table A.6 – Test output parameters (TOPs) for effective reactant utilization test	51
Table A.7 – Derived quantities for effective reactant utilization test	52
Table A.8 – Test input parameters (TIPs) for durability test	53
Table A.9 – Test output parameters (TOPs) for durability test	54
Table A.10 – Derived quantities for constant load durability test	54
Table A.11 – Test input parameters (TIPs) for temperature sensitivity test	55
Table A.12 – Test output parameters (TOPs) for temperature sensitivity test	56
Table A.13 – Derived quantities for temperature sensitivity test	56
Table A.14 – Test input parameters (TIPs) for EIS test	58
Table A.15 – Test output parameters (TOPs) for EIS test	59
Table A.16 – Derived quantities for EIS test	59
Table A.17 – Test input parameters (TIPs) for current cycling durability test within a single operating mode (fuel cell or electrolysis)	60
Table A.18 – Test input parameters (TIPs) for current cycling durability test covering both operating modes (fuel cell and electrolysis)	60
Table A.19 – Test output parameters (TOPs) for current cycling durability test	61
Table A.20 – Derived quantities for current cycling durability test	61
Table A.21 – Test input parameters (TIPs) for thermal cycling	65
Table A.22 – Test output parameters (TOPs) for thermal cycling	65
Table A.23 – Derived quantities for thermal cycling test	66
Table A.24 – Test input parameters (TIPs) for pressurized testing	69
Table A.25 – Test output parameters (TOPs) for pressurized testing	69
Table A.26 – Derived quantities for pressurized test	69
Table C.1 – Generic formulae	76

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

FUEL CELL TECHNOLOGIES –

**Part 8-101: Energy storage systems using fuel cell modules
in reverse mode – Test procedures for the performance of solid oxide
single cells and stacks, including reversible operation**

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as "IEC Publication(s)"). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International, governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 62282-8-101 has been prepared by IEC technical committee 105: Fuel cell technologies.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
105/765/FDIS	105/779/RVD

Full information on the voting for the approval of this International Standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This document has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all parts in the IEC 62282 series, published under the general title *Fuel cell technologies*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of this document will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC website under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific document. At this date, the document will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

This document describes test methods for a single cell or stack (denoted as "cell/stack" hereafter) that are intended for application to energy storage systems using solid oxide fuel cells (SOFC) in combination with solid oxide electrolysis cells (SOEC), or directly using reversible solid oxide cells (Re-SOC, see Note in Clause 1). The test methods aim to provide guidelines for the characterization of real-time performance and durability of the cell/stack.

SOFC, SOEC and Re-SOC have a broad range of geometries (e.g. planar, tubular and their variations) and size. As such, in general, peripherals like current collectors and gas manifolds are unique to each cell or stack and are often incorporated into a cell or stack to form one integrated unit. In addition, they tend to have a significant effect on the power generation characteristics of the cell or stack. This document therefore introduces as its subject "cell/stack assembly units", which are defined as those units containing not only a cell or a stack but also peripherals.

This document is generally applicable to all types or geometries of SOFC, SOEC and Re-SOC, unless where explicitly mentioned.

IEC 62282-8 (all parts) aims to develop performance test methods for power storage and buffering systems based on electrochemical modules (combining electrolysis and fuel cells, in particular reversible fuel cells), taking into consideration both options of re-electrification and substance (and heat) production for sustainable integration of renewable energy sources.

Under the general title "Energy storage systems using fuel cell modules in reverse mode", the IEC 62282-8 series will consist of the following parts:

- IEC 62282-8-101: *Test procedures for the performance of solid oxide single cells and stacks, including reversible operation*
- IEC 62282-8-102: *Test procedures for the performance of single cells and stacks with proton exchange membranes, including reversible operation*
- IEC 62282-8-103¹: *Alkaline single cell and stack performance including reversible operation*
- IEC 62282-8-201: *Test procedures for the performance of power-to-power systems*
- IEC 62282-8-202²: *Power-to-power systems – Safety*
- IEC 62282-8-300 series³: *Power-to-substance systems*

As a priority dictated by the emerging needs for industry and opportunities for technological development, IEC 62282-8-101, IEC 62282-8-102 and IEC 62282-8-201 have been initiated jointly and as a priority. These documents are presented as a package to highlight the need for an integrated approach as regards the system application (i.e. a solution for energy storage) and its fundamental constituent components (i.e. fuel cells operated in reverse or reversible mode).

IEC 62282-8-103, IEC 62282-8-202 and IEC 62282-8-300 (all parts) are suggested but are left for initiation at a later stage.

¹ Under consideration.

² Under consideration.

³ Under consideration.

FUEL CELL TECHNOLOGIES –

Part 8-101: Energy storage systems using fuel cell modules in reverse mode – Test procedures for the performance of solid oxide single cells and stacks, including reversible operation

1 Scope

This part of IEC 62282 addresses solid oxide cell (SOC) and stack assembly unit(s). It provides for testing systems, instruments and measuring methods to test the performance of SOC cell/stack assembly units for energy storage purposes. It assesses performance in fuel cell mode, in electrolysis mode and/or in reversible operation.

This document is not applicable to small button cells that are designed for SOC material testing and provide no practical means of reactant utilization measurement, or to single-chamber SOC. This document is not intended to be applied to fuel cell/stack assembly units for power generation purposes only, since this is covered in IEC TS 62282-7-2. Therefore, test methods are not included in this document that are applicable to fuel cell mode only and that are already described in IEC TS 62282-7-2.

This document is intended for data exchanges in commercial transactions between cell/stack manufacturers and system developers or for acquiring data on a cell or stack in order to estimate the performance of a system based on it. Users of this document may selectively execute test items suitable for their purposes from those described in this document. Users can also substitute selected test methods of this document with equivalent test methods of IEC TS 62282-7-2 for SOC operation in fuel cell mode only.

NOTE 1 In the context of this document, the term "reversible" does not refer to the thermodynamic meaning of an ideal process. It is common practice in the fuel cell community to call the operation mode of a solid oxide cell that alternates between fuel cell mode and electrolysis mode "reversible".

NOTE 2 This document considers only steam electrolysis. Other reactants in electrolysis mode can be used, provided appropriate measures are taken for handling the specific reactants and products, and the guidelines as regards the measurement, control and post-test analysis of results are adapted accordingly.

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050-485, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 485: Fuel cell technologies* (available at www.electropedia.org)

IEC 61515:2016, *Mineral insulated metal-sheathed thermocouple cables and thermocouples*

IEC 60584-1, *Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances*

IEC 60584-3, *Thermocouples – Part 3: Extension and compensating cables – Tolerances and identification system*

ISO 5168, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*

ISO 6141, *Gas analysis – Contents of certificates for calibration gas mixtures*

ISO 6142-1, *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures – Part 1: Gravimetric method for Class I mixtures*

ISO 6143, *Gas analysis – Comparison methods for determining and checking the composition of calibration gas mixtures*

ISO 6145-7, *Gas analysis – Preparation of calibration gas mixtures using dynamic volumetric methods – Part 7: Thermal mass-flow controllers*

ISO 6974 (all parts), *Natural gas – Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography*

ISO 7066-2, *Assessment of uncertainty in the calibration and use of flow measurement devices – Part 2: Non-linear calibration relationships*

ISO 8756, *Air quality – Handling of temperature, pressure and humidity data*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	85
INTRODUCTION.....	87
1 Domaine d'application	88
2 Références normatives	88
3 Termes, définitions, termes abrégés et symboles	89
3.1 Termes et définitions	89
3.2 Termes abrégés et symboles	96
3.2.1 Termes abrégés.....	96
3.2.2 Symboles.....	96
3.3 Conditions de référence du gaz.....	100
4 Conditions générales de sécurité.....	100
5 Environnement d'essai	101
5.1 Généralités	101
5.2 Cellule	101
5.3 Pile	102
5.4 Installation expérimentale	103
5.4.1 Généralités	103
5.4.2 Équipement de contrôle des gaz d'électrode.....	103
5.4.3 Équipement de gestion thermique.....	103
5.4.4 Équipement de contrôle de la charge/de l'alimentation électrique	104
5.4.5 Équipement de mesure et d'acquisition de données.....	104
5.4.6 Équipement de sécurité	104
5.4.7 Équipement de contrôle de la force de compression	104
5.4.8 Équipement de contrôle de la pression	104
5.5 Interface entre l'objet d'essai et l'installation expérimentale	104
5.6 Contrôle des paramètres et mesurage	106
5.7 Incertitude de mesure des TIP et TOP	107
5.8 Montage de l'objet d'essai dans l'installation expérimentale.....	107
5.9 Critères de stabilité.....	108
6 Instruments et méthodes de mesure	108
6.1 Généralités	108
6.2 Incertitude des instruments	108
6.3 Instruments et méthodes de mesure recommandés.....	109
6.3.1 Mesurage du débit d'entrée du gaz d'électrode.....	109
6.3.2 Mesurage de la composition du gaz d'électrode.....	109
6.3.3 Mesurage de la température du gaz d'électrode.....	110
6.3.4 Mesurage de la pression du gaz d'électrode	110
6.3.5 Mesurage du débit du gaz d'échappement de l'électrode	111
6.3.6 Mesurage de la tension de l'entité d'assemblage de cellules/piles	111
6.3.7 Mesurage du courant de l'entité d'assemblage de cellules/piles.....	111
6.3.8 Mesurage de la température de l'entité d'assemblage de cellules/piles.....	111
6.3.9 Mesurage de la force de compression.....	111
6.3.10 Mesurage de l'impédance totale	112
6.3.11 Mesurage des conditions ambiantes	112
6.4 Conditions d'essai et recommandations du fabricant.....	112
6.4.1 Conditions de démarrage et d'arrêt.....	112

6.4.2	Plage des conditions d'essai.....	112
6.4.3	Stabilisation, conditions d'initialisation et état stable.....	113
6.4.4	Durée de maintien, durée de mise en équilibre, durée d'acquisition	113
6.5	Méthode d'acquisition des données	113
7	Procédures d'essai et calcul des résultats	113
7.1	Généralités	113
7.2	Essai de caractéristiques courant-tension	114
7.2.1	Objectif de l'essai	114
7.2.2	Méthode d'essai	114
7.2.3	Post-traitement des données	114
7.3	Essai d'utilisation de réactif efficace	115
7.3.1	Objectif de l'essai	115
7.3.2	Méthode d'essai	115
7.3.3	Post-traitement des données	116
7.4	Essai de durabilité	116
7.4.1	Objectif de l'essai	116
7.4.2	Méthode d'essai	116
7.4.3	Post-traitement des données	116
7.5	Essai de sensibilité à la température.....	117
7.5.1	Objectif de l'essai	117
7.5.2	Méthode d'essai	117
7.5.3	Post-traitement des données	118
7.6	Essai de séparation des composants de résistance au moyen de la spectroscopie de l'impédance électrochimique.....	118
7.6.1	Objectif de l'essai	118
7.6.2	Méthode d'essai	119
7.6.3	Post-traitement des données	119
7.7	Essai de durabilité à cycle de courant.....	120
7.7.1	Objectif de l'essai	120
7.7.2	Méthode d'essai	120
7.7.3	Post-traitement des données	121
7.8	Essai de cycle thermique	121
7.8.1	Objectif.....	121
7.8.2	Méthode d'essai	121
7.8.3	Post-traitement des données	122
7.9	Essai sous pression	122
7.9.1	Objectif de l'essai	122
7.9.2	Méthode d'essai	122
7.9.3	Post-traitement des données	123
8	Rapport d'essai	123
8.1	Généralités	123
8.2	Éléments contenus dans le rapport	123
8.3	Description des données relatives à l'entité d'essai.....	124
8.4	Description des conditions d'essai	124
8.5	Description des données d'essai.....	124
8.6	Évaluation de l'incertitude	124
Annexe A (normative)	Procédures d'essai détaillées	125
A.1	Objectif d'essai	125
A.2	Installation	125

A.3	Essai de caractéristiques courant-tension (voir 7.2)	126
A.3.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	126
A.3.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	126
A.3.3	Grandeurs dérivées	127
A.3.4	Mesurage des caractéristiques courant-tension	127
A.4	Essai d'utilisation de réactif efficace (7.3)	129
A.4.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	129
A.4.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	131
A.4.3	Grandeurs dérivées	131
A.4.4	Mesurage de l'utilisation de réactif efficace	132
A.5	Essai de durabilité (7.4)	133
A.5.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	133
A.5.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	133
A.5.3	Grandeurs dérivées	134
A.5.4	Mesurage de la durabilité	134
A.6	Essai de sensibilité à la température (7.5)	135
A.6.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	135
A.6.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	136
A.6.3	Grandeurs dérivées	136
A.6.4	Mesurage de la sensibilité à la température	137
A.7	Essai de séparation des composants de résistance au moyen de la spectroscopie de l'impédance électrochimique (7.6)	138
A.7.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	138
A.7.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	138
A.7.3	Grandeurs dérivées	139
A.7.4	Mesurage des composants de résistance au moyen de l'EIS	139
A.7.5	Mesurage des plages de fréquences	139
A.8	Essai de durabilité à cycle de courant (7.7)	140
A.8.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	140
A.8.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	141
A.8.3	Grandeurs dérivées	141
A.8.4	Mesurage de la durabilité à cycle de courant	141
A.9	Essai de cycle thermique (7.8)	144
A.9.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	144
A.9.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	145
A.9.3	Grandeurs dérivées	146
A.9.4	Mesurage du cycle thermique	146
A.10	Essai sous pression (7.9)	148
A.10.1	Paramètres d'entrée d'essai (TIP)	148
A.10.2	Paramètres de sortie d'essai (TOP)	149
A.10.3	Grandeurs dérivées	149
A.10.4	Mesurage de l'essai sous pression	149
Annexe B (informative) Lignes directrices relatives à la spectroscopie de l'impédance électrochimique (EIS)		151
B.1	Principes généraux	151
B.2	Équipement et installation d'essai de l'EIS	153
B.3	Représentation des résultats	153
B.4	Analyse et simulation des données	155
Annexe C (normative) Formules pour le calcul des valeurs d'utilisation		156

C.1	Formules génériques	156
C.2	Dégradation	156
C.3	Résistance spécifique à la surface (ASR).....	157
C.4	Températures	157
	Bibliographie.....	158

Figure 1 – Représentation schématique éclatée d'un objet d'essai d'une cellule élémentaire planaire consistant en une SOC dans un boîtier de cellule.....	102
Figure 2 – Représentation schématique d'un objet d'essai d'une pile SOC planaire avec N RU comprenant une structure de support (plaques haute et basse)	102
Figure 3 – Représentation schématique d'un environnement d'essai d'une entité d'assemblage de cellules/piles SOC	103
Figure 4 – Environnement d'essai avec interfaces entre la cellule SOC et l'installation expérimentale	105
Figure 5 – Environnement d'essai avec interfaces entre la pile SOC et l'installation expérimentale	106
Figure A.1 – Représentation qualitative des TIP lors d'un essai de caractéristiques courant-tension en fonctionnement combiné (SOFC et SOEC).....	128
Figure A.2 – Représentation schématique de la procédure d'essai de caractéristiques courant-tension à deux points de consigne consécutifs k et $k + 1$	128
Figure A.3 – Représentation schématique d'une courbe $J-V$ en mode électrolyse et pile à combustible	129
Figure A.4 – Représentation qualitative des TIP lors de la réalisation d'un essai d'utilisation de réactif efficace, en modifiant le débit du réactif de l'électrode négative ($q_{V,neg,in}$) qui consiste en de l'hydrogène et de l'azote	132
Figure A.5 – Représentation qualitative des TIP lors d'un essai de durabilité (en mode galvanostatique)	135
Figure A.6 – Représentation qualitative des TIP lors d'un essai de sensibilité à la température	137
Figure A.7 – Représentation qualitative des TIP lors d'un essai de durabilité à cycle de courant	143
Figure A.8 – Profil de courant d'un système SOEC avec commutation rapide en conditions thermiquement neutres	144
Figure A.9 – Profil de courant d'un système SOEC avec commutation rapide en conditions exothermiques	144
Figure A.10 – Profil de courant d'un système SOEC avec une source d'énergie renouvelable et des conditions thermiquement neutres	144
Figure A.11 – Profil de courant d'un système SOEC avec une source d'énergie renouvelable et des conditions exothermiques	144
Figure A.12 – Évolution générale des TIP lors d'un essai: cycle thermique continu au-delà de 600 °C (dans ce cas avec un courant électrique de zéro)	147
Figure A.13 – Évolution générale des TIP lors d'un essai: cycle thermique au-dessous de 600 °C avec modifications du gaz et du courant (couplage avec le fonctionnement à courant constant par exemple).....	148
Figure B.1 – Signaux d'entrée/sortie lors de la spectroscopie de l'impédance électrochimique (EIS) d'une cellule à combustible/électrolyse à oxyde solide	152
Figure B.2 – Installation d'essai de la spectroscopie de l'impédance électrochimique d'une pile à combustible/électrolyse à oxyde solide planaire avec 5 unités répétées.....	153
Figure B.3 – Diagramme de Bode représentant le module d'impédance et l'angle de phase par rapport à la fréquence d'excitation.....	154

Figure B.4 – Diagramme de Nyquist représentant la partie imaginaire par rapport à la partie réelle de l'impédance 155

Tableau 1 – Symboles	96
Tableau 2 – Critères de stabilité des TIP et TOP comme référence.....	108
Tableau 3 – Incertitude des instruments pour chaque grandeur à mesurer	109
Tableau A.1 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai de caractéristiques courant-tension.....	126
Tableau A.2 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai des caractéristiques courant-tension.....	127
Tableau A.3 – Grandeurs dérivées pour un essai des caractéristiques courant-tension.....	127
Tableau A.4 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai d'utilisation de réactif à l'électrode négative.....	130
Tableau A.5 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai d'utilisation de réactif à l'électrode positive	130
Tableau A.6 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai d'utilisation de réactif efficace.....	131
Tableau A.7 – Grandeurs dérivées pour un essai d'utilisation de réactif efficace.....	132
Tableau A.8 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai de durabilité	133
Tableau A.9 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai de durabilité.....	134
Tableau A.10 – Grandeurs dérivées pour un essai de durabilité à charge constante	134
Tableau A.11 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai de sensibilité à la température	135
Tableau A.12 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai de sensibilité à la température	136
Tableau A.13 – Grandeurs dérivées pour un essai de sensibilité à la température	136
Tableau A.14 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai EIS.....	138
Tableau A.15 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai EIS	139
Tableau A.16 – Grandeurs dérivées pour un essai EIS	139
Tableau A.17 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai de durabilité à cycle de courant en mode de fonctionnement unique (pile à combustible ou électrolyse)	140
Tableau A.18 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai de durabilité à cycle de courant couvrant deux modes de fonctionnement (pile à combustible et électrolyse).....	140
Tableau A.19 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai de durabilité à cycle de courant	141
Tableau A.20 – Grandeurs dérivées pour un essai de durabilité à cycle de courant	141
Tableau A.21 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un cycle thermique	145
Tableau A.22 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un cycle thermique	145
Tableau A.23 – Grandeurs dérivées pour un essai de cycle thermique.....	146
Tableau A.24 – Paramètres d'entrée d'essai (TIP) pour un essai sous pression.....	149
Tableau A.25 – Paramètres de sortie d'essai (TOP) pour un essai sous pression	149
Tableau A.26 – Grandeurs dérivées pour un essai sous pression	149
Tableau C.1 – Formules génériques	156

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

TECHNOLOGIES DES PILES A COMBUSTIBLE –

Partie 8-101: Système de stockage de l'énergie utilisant des modules à piles à combustible en mode inversé – Procédures d'essai pour la performance des cellules élémentaires et des piles à oxyde solide, comprenant le fonctionnement réversible

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale IEC 62282-8-101 a été établie par le comité d'études 105 de l'IEC: Technologies des piles à combustible.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
105/765/FDIS	105/779/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette Norme internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 62282, publiées sous le titre général *Technologies des piles à combustible*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. À cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Le présent document décrit des méthodes d'essai pour une cellule élémentaire ou pile (appelée "cellule/pile" dans le présent document) destinées à être utilisées dans les systèmes de stockage de l'énergie utilisant des piles à combustible à oxyde solide (SOFC) combinées à des piles à électrolyse à oxyde solide (SOEC), ou utilisant directement des piles à oxyde solide réversibles (Re-SOC, voir la Note à l'Article 1). Les méthodes d'essai ont pour objectif de fournir des lignes directrices pour la description des performances en temps réel et pour la durabilité de la cellule/pile.

Les SOFC, SOEC et Re-SOC se présentent sous une large plage de géométries (par exemple, planaire, tubulaire et leurs variations) et de tailles. En général, les périphériques comme les collecteurs de courant et les rampes d'alimentation en gaz sont uniques à chaque cellule ou pile et sont le plus souvent incorporés dans une cellule ou une pile afin de former une unité intégrée. De plus, elles ont tendance à avoir un effet significatif sur les caractéristiques de génération de puissance de la cellule ou pile. Le présent document a donc comme sujet les "entités d'assemblage de cellules/piles", qui sont des entités contenant non seulement une cellule ou une pile mais également des périphériques.

Le présent document s'applique généralement à tous les types ou géométries de SOFC, SOEC et Re-SOC, sauf mention contraire.

L'IEC 62282-8 (toutes les parties) a pour but le développement des méthodes d'essai de performance pour les systèmes de stockage de l'énergie et les systèmes tampons fondés sur des modules électrochimiques (qui combinent des piles à combustible et à électrolyse, en particulier des piles à combustible réversibles), en tenant compte des options de réélectrification et de production de substance (et de chaleur) pour l'intégration durable des sources d'énergie renouvelables.

Sous le titre général "Systèmes de stockage de l'énergie utilisant des modules à piles à combustible en mode inversé", la série IEC 62282-8 comprendra les parties suivantes:

- IEC 62282-8-101: *Procédures d'essai pour la performance des cellules élémentaires et des piles à oxyde solide, comprenant le fonctionnement réversible*
- IEC 62282-8-102: *Procédures d'essai pour la performance des cellules élémentaires et des piles à membrane échangeuse de protons, comprenant le fonctionnement réversible*
- IEC 62282-8-103¹: *Alkaline single cell and stack performance including reversible operation* (disponible en anglais seulement)
- IEC 62282-8-201: *Procédure d'essai pour la performance des systèmes électriques à électriques*
- IEC 62282-8-202²: *Power-to-power systems – Safety* (disponible en anglais seulement)
- Série IEC 62282-8-300³: *Power-to-substance systems* (disponible en anglais seulement)

Les parties 8-101, 8-102 et 8-201, constituant une priorité dictée par les besoins émergents des industries et par les opportunités de développement techniques, ont été initiées conjointement et en premier lieu. Ces parties sont présentées ensemble afin de souligner le besoin d'une approche intégrée relative à l'application du système (c'est-à-dire une solution pour le stockage de l'énergie) et ses composants fondamentaux (c'est-à-dire les piles à combustible fonctionnant en mode inversé ou en mode réversible).

Les parties 8-103, 8-202 et 8-300 sont proposées et laissées comme amorce à une étape ultérieure.

¹ À l'étude.

² À l'étude.

³ À l'étude.

TECHNOLOGIES DES PILES A COMBUSTIBLE –

Partie 8-101: Système de stockage de l'énergie utilisant des modules à piles à combustible en mode inversé – Procédures d'essai pour la performance des cellules élémentaires et des piles à oxyde solide, comprenant le fonctionnement réversible

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 62282 traite des entités d'assemblage de cellules/piles à oxyde solide (SOC). Elle fournit des méthodes de mesure et des instruments aux systèmes afin de soumettre à l'essai la performance des entités d'assemblage de cellules/piles SOC en matière de stockage de l'énergie. Elle évalue la performance des piles à combustible, des piles à électrolyse et/ou en fonctionnement réversible.

Le présent document ne s'applique pas aux petits éléments boutons conçus pour les essais de matière des SOC et ne fournit pas de moyen pratique de mesurage de l'utilisation de réactifs, ou aux SOC à chambre unique. Le présent document n'est pas destinée à être appliquée aux entités d'assemblage de cellules/piles destinées à la génération d'énergie seulement, car celles-ci sont couvertes par l'IEC TS 62282-7-2. Par conséquent, les méthodes d'essai applicables au mode combustible seulement et déjà décrites dans l'IEC TS 62282-7-2 ne sont pas comprises dans le présent document.

Le présent document est destiné à être utilisé pour les échanges de données des transactions commerciales entre les fabricants de cellules/piles et les développeurs système, ou pour l'acquisition de données relatives à une cellule ou une pile permettant d'estimer la performance d'un système qui se base sur cette cellule/pile. Les utilisateurs du présent document peuvent choisir les éléments d'essai à exécuter selon leurs objectifs à partir de ceux décrits dans le présent document. Les utilisateurs peuvent également substituer les méthodes d'essai choisies dans le présent document avec des méthodes d'essai équivalentes données dans l'IEC TS 62282-7-2 pour les SOC fonctionnant en mode combustible seulement.

NOTE 1 Dans le contexte du présent document, le terme "réversible" ne fait pas référence au processus idéal thermodynamique. Il est courant dans le domaine des piles à combustible d'appeler "réversible" le fonctionnement d'une pile à oxyde solide qui alterne entre le mode combustible et le mode électrolyse.

NOTE 2 Le présent document ne prend en considération que les électrolyses de la vapeur. D'autres réactifs en mode électrolyse peuvent être utilisés, à condition que des mesures appropriées soient prises pour le traitement des réactifs et des produits spécifiques, et que les lignes directrices relatives au mesurage, au contrôle et à l'analyse des résultats post-essai soient adaptées en conséquence.

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050-485, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 485: Technologies des piles à combustible* (disponible sous www.electropedia.org)

IEC 61515:2016, *Câbles et couples thermoélectriques à isolation minérale dits "chemisés"*

IEC 60584-1, *Couples thermoélectriques – Partie 1: Spécifications et tolérances en matière de FEM*

IEC 60584-2, *Couples thermoélectriques – Partie 2: Tolérance*

IEC 60584-3, *Couples thermoélectriques – Partie 3: Câbles d'extension et de compensation – Tolérances et système d'identification*

ISO 5168, *Measurement of fluid flow – Procedures for the evaluation of uncertainties*
(disponible en anglais seulement)

ISO 6141, *Analyse des gaz – Contenu des certificats des mélanges de gaz pour étalonnage*

ISO 6142-1, *Analyse des gaz – Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage – Partie 1: Méthode gravimétrique pour les mélange de Classe I*

ISO 6143, *Analyse des gaz – Méthodes comparatives pour la détermination et la vérification de la composition des mélanges de gaz pour étalonnage*

ISO 6145-7, *Analyse des gaz – Préparation des mélanges de gaz pour étalonnage à l'aide de méthodes volumétriques dynamiques – Partie 7: Régulateurs thermiques de débit massique*

ISO 6974 (toutes les parties), *Gaz naturel – Détermination de la composition avec une incertitude définie par chromatographie en phase gazeuse*

ISO 7066-2, *Évaluation de l'incertitude dans l'étalonnage et l'utilisation des appareils de mesure du débit – Partie 2: Relations d'étalonnage non linéaires*

ISO 8756, *Qualité de l'air – Traitement des données de température, de pression et d'humidité*